

발간등록번호

11-1541000-001220-01

고효율 LED 광원을 사용한 에너지절감/친환경성  
식물 재배기 및 작물 적용 기술 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Energy  
Saving/Environmentally Friendly Plant Growth Systems  
and Their Application Methodologies Utilizing  
High Efficient Light Emitting Diodes

연세대학교 산학협력단

농림수산식품자료실



0004563

농림수산식품부

# 제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “고효율 LED 광원을 사용한 에너지절감/친환경성 식물 재배기 및 작물 적용 기술 개발에 관한 연구” 과제의 보고서로 제출합니다.

2011년 12월 19일

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 신 무 환

세부연구책임자 : 신 무 환

연 구 원 : 최 종 화

연 구 원 : 장 선 호

연 구 원 : 강 영 은

연 구 원 : 문 소 현

연 구 원 : ZHAO HU

협동연구기관명 : (주)피엘티

협동연구책임자 : 김 봉 수

협동연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

협동연구책임자 : 전 창 후

# 요 약 문

## I. 제 목

고효율 LED 광원을 사용한 에너지절감/친환경성 식물 재배기 및 작물 적용 기술 개발

## II. 연구목표

본 과제에서는 전통적인 기존 광원을 적용한 식물 재배기나 기존에 일부 채용되었던 LED 적용 식물재배기와 비교하여 월등한 에너지 절감 효과를 구현할 수 있는 고효율 LED 식물재배기를 개발하고 이를 식물에 적용하는 성장 기술을 개발함에 최종 목표를 둔다. 이를 위하여서는 고효율 LED 모듈 및 구동회로 설계 기술, 패키지 및 모듈의 광/방열 설계 기술, 신광원에 대한 식물의 최적성장조건 구현 기술, LED 광원과 식물의 반응성 평가기술 등의 원천적인 요소 기술 등이 확립되어야 하며 이를 위하여 다음과 같은 구체적인 목표를 설정하고 달성하였다.

- . 기존 메탈등 대비 에너지 절감 70% 이상의 LED 광원 식물재배기 개발
  - 1m 길이의 LED 모듈 기준 200  $\mu\text{mol}$  이상 광합성능 확보
  - 방열 최적화를 통해 80W (LED 60개 형)작동 시 케이스 온도 60 $^{\circ}\text{C}$  이하 보장
  - LED 모듈 효율 85 %, 전원장치 효율 90 % 이상 급
  - 2 차 렌즈 장착형
- . 고효율 LED 식물 재배기를 적용한 식물 재배 기술 개발 및 생육 특성 연구
  - 고효율 LED 파장과 광도에 따른 과채류 묘의 생리적, 형태적 특성 평가
  - 식물공장형 육묘 시스템의 고효율 광원으로서의 적용 기술 개발
  - 식물 생산 공정 단계별 고효율 LED의 활용 기술 개발

## III. 연구개발 내용 및 범위

본 과제에서는 상기 목표를 성공적으로 달성하기 위하여 필수적인 핵심기술과 그 연구내용의 범위를 결정하였고, 이에 따라 각 연구내용의 전문가로 이루어진 1 개의 세부 과제 및 2 개의 협동과제로 구성되었다. 각 과제별 연구 내용은 다음과 같다.

- . 제 1 세부과제

- 열천이법 적용을 통한 LED 모듈의 성능 분석 및 설계(multi package type)
- LED 모듈 기구의 방열설계 개선 및 최적화연구
- 식물재배기용 LED 모듈의 광 효율 분석 연구

#### . 제 1 협동과제

- LED 모듈 효율 및 전원장치 효율 개선 연구
- 2차 렌즈 적용기술 연구 및 LED 모듈 광합성능 개선 연구
- 1 세부와의 연계를 통한 LED모듈 저가격화 기술 및 조명 기구 최적 설계 연구

#### . 제 2 협동과제

- 고효율 LED의 파장과 광도 조건에서 파프리카, 토마토, 수박 등 주요 과채류 묘의 생리적, 형태 특성 평가
- 고품질 우량 과채류 묘의 안정적 생산을 위한 식물공장형 육묘 시스템에의 고효율 LED 모듈 적용 기술 개발
- 식물 생산 공정 단계별로 적용 가능한 고효율 LED의 활용 기술 개발

### IV. 연구개발에 따른 기대 성과

LED의 에너지 절감 및 친환경적인 장점으로 인하여 선진국에서는 이미 LED를 이용한 식물재배 시스템의 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 일반적으로 LED는 에너지 절감 및 친환경적인 광원으로 알려지고 있으며 이에 따라 LED를 적용한 식물재배기에 대한 연구는 국내에서도 일부 이루어지고 있지만, 본 과제에서 제안한 여러 원천적인 요소 기술이 구현되고 적용되어야만 LED의 이러한 본질적인 장점이 구현되어 실용화 및 보급화에 필수적인 식물재배기의 단가 및 신뢰성을 확보할 수 있다. 따라서, 본 과제의 성공적인 수행으로 적절한 확산·보급시스템을 통하여 전통적인 기존등에 대비한 LED등의 전력절감효과와 광합성에 필요한 선택적인 광원공급요소로부터 막대한 에너지 절감효과가 기대되며, 신개념의 고부가 가치의 청정·고품위 작물을 적기·적소에 공급할 수 있음으로서 농촌수익의 증대에 크게 이바지 할 것으로 사료된다. 또한 전통적인 농업기술에 최고의 IT기술을 접목한 새로운 산업형태를 창출함으로써 농업사회의 새로운 일자리 창출과 새로운 신개념의 관련 산업을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

### V. 연구성과 및 성과활용 계획

#### ◎ 식물의 인공광 환경에 대한 연구의 획기적 발판 마련

- 단색 LED 의 특성, LED 간의 혼합광 및 기존광원과 LED간의 혼합광 등의 광질 특성 규명
- 건전묘 생산을 위한 고효율 LED 모듈을 활용한 조명 시스템 구현하고 이를 활용한 묘소질 증진 효과 규명

- 고효율 LED 모듈을 식물공장형 육묘 시스템에 적용
- 신개념의 고부가 가치의 청정·고품위 작물을 적기·적소에 공급 가능

◎ 친환경적/에너지 절감형 식물재배기 및 작물 적용 기술의 보급

- 실제 현장 보급을 통해 기술력에 대한 모니터링을 실시하여 기술 적용 시 장·단점 및 성과 분석, 추가사항에 대한 개선 방안 모색을 통한 상용화 노력
- 특정 작물뿐만이 아니라 적용 범위를 확대하여 시설작물 전반에 걸친 기술의 보급
- LED 광원을 사용한 식물재배의 핵심·원천 기술의 이전을 통한 첨단농업의 사업화

◎ 기술의 현장 접목 및 실용화 방안 모색

- 식물공장형 육묘 시스템에서의 LED 모듈의 적용성과 효율성을 검토
- 온실 육묘 시의 보광(補光) 시스템으로서의 LED 모듈의 적용성과 효율성을 검토

# 목 차

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

- \* 연구개발의 목적, 필요성 및 범위 등을 기술

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

- \* 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- \* 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

- \* 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술 발전에의 기여도 등을 기술

## 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

- \* 실용화·산업화 계획(기술실시 등)
- \* 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등
- \* 특허, 품종, 논문 등 지식재산권 확보계획 등
- \* 추가연구, 타연구에 활용 계획 등
- \* 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

## 제 7 장 참고문헌

- \* 보고서 작성 시 인용된 모든 참고문헌을 열거

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

초고유가 현상 및 온실가스 감축의무의 현실화, 자원고갈 등으로 인해 에너지 자원의 효율적 이용과 절약이 지속가능한 경제성장을 결정짓는 중요한 변수로 대두되고 있다. 정부에서도 친환경·에너지안보를 위한 “녹색성장”이 신성장동력 창출을 위한 새로운 비전의 축으로 제시될 만큼 그 중요성은 나날이 증대되고 있다. 특히 농업 분야에서의 에너지 자원 활용가치가 최근 세계적으로 급속히 진전이 이루어지고 있는 상황이다. 따라서 우리 농업분야에도 에너지 절감 및 친환경적인 전문 기술 확보가 시급히 요구되고 있는 입장이다. 특히 고부가 가치를 갖는 화훼 및 작물의 경우 많은 일조량과 에너지를 필요로 하며 지역적으로 제한도 많다. 우리나라와 같이 경지면적이 협소하며 산간지가 많은 경우는 생산성 증대를 위해 무수히 많은 에너지가 소모되고 있다. 그러므로 좁은 면적에서 고도의 정밀 환경제어 기술을 이용하여 생산성을 높이는 방식. 즉, 화훼·작물의 재배, 성장 및 수송·출하 시기의 조절을 위한 차세대형 온실이 개발되어야 한다.

이를 위해서는 작물을 공업제품과 같이 규격과 품질이 동일하게 생산할 수 있는 농업의 공업화가 선행되어야 한다. 따라서 자연환경에 의존하지 않고 생산량과 품질, 생산시기 등을 인간의 욕구에 맞게 성취하기 위한 노력과 연구의 결과로 태양의 보조광원(인공조명기구)과 양액 및 인공배지 등을 적용한 첨단 농업 생산 기술이 절실히 요구되고 있다.



그림 1. 인공 광원을 이용한 작물 재배 시설

실제로 오스트리아의 루스나(Ruthner), 미국의 제너럴 일렉트릭(GE), 일본 등에서는 20~30년 전부터 농업의 공업화를 위해 노력하고 있다. 오스트리아의 루스나 사의 경우는 입체식 이동 재배 방식을 개발하여 태양광 대신 인공램프를 배치한 인공 생육실을 통해 채소를 재배·생산하고 있다. 미국의 거대 전기회사인 제너럴 일렉트릭 사에서는 자체개발한 재배용 전등을 사용하여 토마토, 오이, 상치 등의 밀식재배를 수행해 생산성을 높이고 있으며 그 품질 또한 인정받고 있다. 일본의 경우 세계 최초로 식물 성장 환경의 최적조건을 발견하여 일반노지 대비 5~6배 이상의 성장 소득을 향상시켰으며 최근에는 에너지 절감/무공해 광원인 LED 이용한 식물공장 시범단지를 가동하고 있다.

그러나 오스트리아의 루스나 사와 미국의 제너럴 일렉트릭 사에서 작물 재배에 사용한 재래

식 등은 수은 등의 환경유해 물질을 함유하거나 전기소모량이 많아 비경제적이다. 또한 광원의 파장대는 작물 재배의 적정 파장대와 일치하지 않는 문제점이 있다. 농업의 공업화를 위해서는 이러한 문제가 조속히 해결되어야 한다.

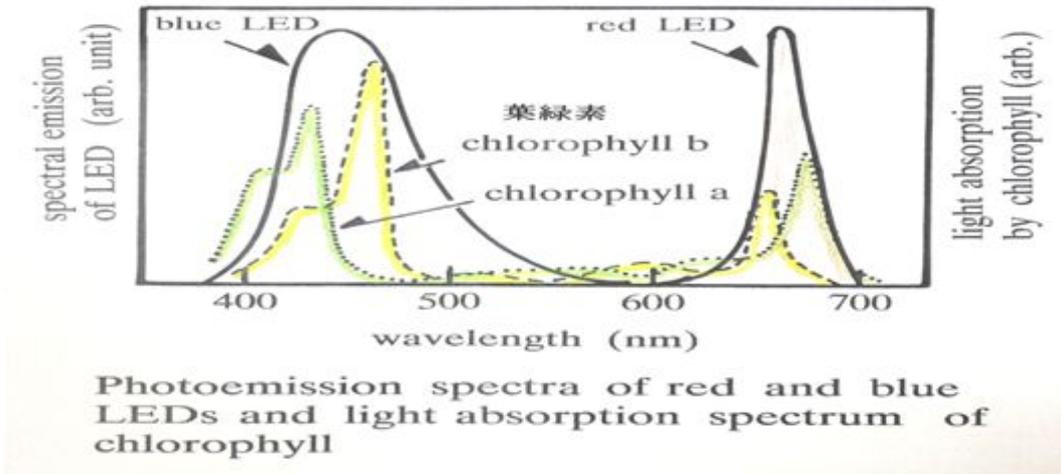


그림 2. LED 파장과 광합성 시 식물의 빛 흡수

우리나라에서도 정확한 통계는 없으나, 장미, 백합 등의 화훼류와 파프리카, 딸기, 토마토 재배와 유묘 생산에 백열등, 고압나트륨등이 부족한 광량을 보충하는 보광용으로 사용되고 있으며 일부 농가에서는 형광등, 할로젠등, 고압수은등을 같은 목적으로 사용하고 있다. 한편 딸기, 국화, 잎들깨, 부추, 고추 시설재배 시에는 개화지연(혹은 촉진)에 필요한 일조시간의 보충을 위해 (전조재배) 백열등을 인공광원으로 사용하고 있으며 일부에서는 형광등, 할로젠등, 고압나트륨등을 사용하기도 한다. 전조재배에 널리 사용되는 백열등은 광주기성과 관련된 조절 기능과 관련이 있는 원적외선 영역의 빛이 상대적으로 높아 백열등 빛을 유일한 광원으로 할 경우에는 줄기의 신장이 촉진되며, 광원의 에너지효율이 낮고 (전기에너지의 7%정도만 빛으로 전환) 다량의 열을 발생한다는 문제가 있다. 형광등은 소규모의 식물성장상이나 종자발아상과 같은 장비의 광원으로서 에너지 효율이 20%정도이나 전구의 용량이 작아 20~50W 이상의 고휘도 광원이 필요한 온실에서는 상대적으로 많은 개수의 전구가 필요하고 이로 인해 작물에 불필요하게 그림자가 지는 문제가 있어 잘 사용하지 않는다. 온실 보광용 HID등에는 할로젠등, 고압수은등, 고압나트륨등 등이 있으며 이 중 가장 널리 사용되는 것은 고압나트륨등(400~1,000W)은 400~700nm의 가시광선영역과 700~850nm의 원적외선을 약 25%의 에너지효율로 발생시킨다. 그러나 가장 강한 빛을 내는 영역은 589nm 부근의 황색광 영역으로 식물의 광합성에 이용되는 효율이 낮은 파장대이고, 전구의 수명이 짧다는 것과 열과 소음을 발생시킨다는 문제가 있다.

최근 신 광원으로 각광받고 있는 LED는 고효율(100lm/W)이며 기존의 재래식 등에 내재된 수은이 전혀 없는 무공해, 친환경, 에너지 절감형 광원으로 재래식 등의 문제점을 개선할 대체 조명으로 부각되고 있다. LED는 전 가시광선 영역을 포함하므로 작물 재배에 필요한 파장대만을 정확히 조사하여 불필요한 파장 발생으로 인한 에너지 낭비를 줄이고 작물의 생산성 및 품질 향상에도 크게 기여할 수 있다.

작물 재배의 광원으로 LED가 주목받는 이유는 다음과 같다.

- ① 식물의 광합성 및 성장에 필요한 단색광을 자유로이 조사 가능

- ② 낮은 소비전력
- ③ 반영구적 수명
- ④ 친환경적(무수은)
- ⑤ 열방사가 없음
- ⑥ 광합성에 필요한 펄스 조사 가능
- ⑦ 빛의 세기를 자유로이 조절 가능
- ⑧ 광원의 크기가 작고 가볍기 때문에 조명 설계 및 제작이 용이

종류	백열등 	할로젠램프 	형광등 	컴팩트형광등 	고출력 LED 
광원효율 (lm/W)	15	30	70	50	100
조명기구 빛 손실 보존율(%)	30~50	30~50	60~70	50~60	95
실광효율 (lm/W)	7	14	38	23	76
800lm 기준 소비전력	114	57	21	35	10.5
수명(시간)	1000	3000	8000	8000	25000

(서울반도체)

표 1. 광원별 특성

표 1은 다양한 종류의 조명용 광원의 특성을 나타낸 것이다. LED의 경우 다른 광원들에 비해 발광효율이 매우 우수하다. 또한, 같은 광도에서 LED는 다른 광원들에 비해 평균 30% 정도의 적은 양의 전기를 소비한다. 따라서 LED를 식물재배용 광원으로 적용 시 긴 수명과 낮은 소비전력으로 인한 에너지절감 효과가 클 것으로 사료된다.

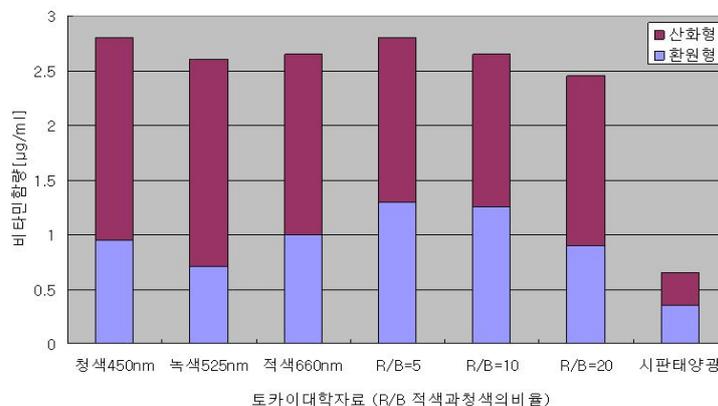


그림 3. LED 조명이 식물의 비타민 함량에 미치는 효과

그림 3은 LED 조명을 인공광원으로 사용했을 때의 식물 내 비타민 함량을 태양광을 이용한 경우와 비교한 그래프이다. LED를 인공광원으로 사용한 경우가 태양광을 이용해 재배한 경우보다 비타민 함량 면에서도 월등히 우수하다는 것을 알 수 있다. 이처럼 LED는 작물 재배의 인공 광원으로 많은 장점이 있지만 이를 농가에 보급하기 위해서는 현장 적용시험을 통한 인식제고, 광 조절 장치 개발, 초기 설치 경비 절감, LED 조명기의 양산 기술 구축 등의 많은 기술적 과제가 있다. 지속적인 기술개발 및 양산화 기술로 이러한 기술적 과제가 해결되어 효율 증대 및 가격하락으로 이어진다면 에너지 절감효과, 농산물의 품질향상 및 생산성 증대 등 농가수익창출에 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 연구의 수행 결과로 LED 광조사가 식물체의 생장 및 광형태 형성에 미치는 효과를 규명하여 식물재배용 인공광원으로서의 LED 이용가능성을 제시한다면, 새로운 광원으로서 인공광 이용형 식물공장체제를 발전시킬 수 있다. 이에 따라, 기존의 생장상과 같이 밀폐된 소공간에서의 광 환경을 향상시켜 양질묘의 생산이 가능해지며 기존 조명에 비해 소비전력이 낮은 고효율의 LED 사용으로 에너지 절감에도 큰 영향을 미칠 것이다. 21세기 한국농업은 식물재배의 산업화를 위해서 앞으로 재배공간의 식물공장화, 시설재배 시 환경조절의 자동화 및 단순화를 실현할 수 있어야만 국제경쟁력을 기를 수 있다. 따라서 한국농업에 있어서 새로운 광환경의 개념도입으로 미래형 농업에 대한 의식을 고취시키는데도 크게 기여할 것이다. 또한, LED를 이용한 광조사 시스템의 개발에 의해 LED에 대한 기술개발의 촉진 및 관심고조로 구매단가를 낮추어 LED를 식물재배에 이용하는 기회를 높임으로써 농업분야에서 LED의 실용화 및 대중화가 실현될 가능성이 있어, 기존시설의 합리적 이용과 연구기관의 확대 등이 가능해질 것이다.

## 제 2 절 연구 개발의 범위 및 수행 방법

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
LED 인공광원 모듈의 방열 성능 분석	- 열전이 측정법 (Thermal Transient Method) - 유한체적법 (Finite Volume Method) - Super Position Method	- LED 광원 시스템 구성 변화에 따른 열 특성 변화 분석 - 열적 모델링과 측정 결과 비교·분석을 통한 신뢰성 확보
LED 인공광원 모듈의 광 성능 분석	적분구와 열 특성 분석 시스템의 연계	- 열적 noise를 고려한 정확한 광 특성 분석
다색 적용 LED 인공광원 모듈 개발	변수에 따른 LED 모듈의 광 특성 비교	- 장착된 LED 개수에 따른 광 특성 - 단색/3색 적용에 따른 광 특성
광학 설계 및 식물재배의 환경적 변수에 따른 광 성능 제어	온도/습도 센서와 컬러 패턴 제어 알고리즘의 연계	- 25cm 거리에서 150 umol 이상의 광합성능 값 구현 - 환경적 변수에 따른 색온도 색좌표 제어 기술
과채류 및 엽채류의 광질에 따른 생육 특성 평가	다양한 광질의 광원하에서 육묘 후 생육 비교	- 배추, 청경채, 상추, 토마토 육묘 시 광질에 따른 생육 및 생리 반응

		비교
광질에 따른 광합성 특성 평가	다양한 광질의 광원하에서 육묘 후 광합성 특성 비교	- 배추, 청경채, 상추, 토마토 육묘 시 광질에 따른 순광합성률 및 기공의 형태학적 관찰
접목 순화 시 생존률 증대 및 생육 촉진에 적합한 광질 구명	다양한 광질의 광원하에서 접목 후 생존률 및 순화 정도 비교	- 수박, 고추, 오이 접목묘의 광질에 따른 생존률 및 생육 반응 비교

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 제품생산 및 시장 현황

국내에서 LED를 식물재배용 인공광원으로 이용하여 연구를 진행하고 있는 경우는 극히 드문 일이며, 식물재배에의 이용은 아직 시작단계에도 미치지 못하고 있는 실정이다. 일부민간연구소, 임업연구소와 같은 일부 연구기관이 식물재배용 LED를 보유하고 있으나 아직 본격적으로 식물을 대상으로 하는 연구는 진행되고 있지 않다. 또한, 전북대학, 포항공대, 경희대학 등 소수의 대학에서 LED를 보유하고 식물에의 영향에 대한 규명을 서두르고 있다.

그런데 이러한 연구기관이나 대학에서 보유하고 있는 LED 설비는 거의 수입에 의존하고 있다. 그러나 첨단원에 기술개발연구센터는 1999년부터 LED를 이용한 식물재배용 광 조사 시스템을 개발하여 식물생산에 응용할 목적으로 연구를 시작하여 진행 중에 있어 LED 설비의 국내기술개발이 가능해 질 수 있다.

- 당도를 높여야 상품성이 높아지는 방울토마토나 멜론, 파프리카, 딸기 등 시설 채소에 LED조명 적용이 가능
- 상추 등의 쌈 채소류에 적용이 가능 (Red LED만으로 가능)
- 필룩스에서 싱가포르에 국화재배용 형광등 조명 공급
- 화우테크놀로지서 금산 지역에 깻잎재배용 백색 LED조명등 공급

### 제 2 절 국외 제품생산 및 시장 현황

1960년대 초에 미국에서 LED가 개발된 이래, 그다지 많은 관심을 끌지 못하다가 1990년대에 일본에서 고휘도의 Blue LED가 개발되면서 식물재배 측면에서의 이용가능성이 활발하게 검토되기 시작하였다.

- Kagawa 대학의 Tanaka 교수를 중심으로 일본에서는 식물재배용 인공광원으로서의 LED에 대한 연구가 활발하게 진행되기 시작하였고 LED가 식물재배에 유효하다는 연구 결과 등이 보고되기 시작
- 1991년에 Chiba 대학의 Kozai 교수 팀들이 감자 배양소식물체를 이용한 LED 광조사 효과를 보고
- 미국의 경우에는 NASA를 중심으로 하는 연구팀과 각 대학 연구기관에서 활발한 연구를 진행 중으로 Phytochrome 생리에 대한 연구를 정력적으로 수행

일본의 경우 주로 발광다이오드 maker가 중심이 되어 발광파장역 확대나 고휘도화에 대한 연구가 진행된 결과, 현재는 광도가 높고 다채로운 색의 발광다이오드 램프가 비교적 저가격으로 보급되고 있다. 발광다이오드는 발광(發光) 디바이스로서 우수한 표시기능을 갖고 있으며 식물용 재배광원으로서도 그 밖의 광원에는 없는 특성을 갖고 있다. 일본에서는 식물재배용 인공광원으로서 발광다이오드의 특징을 충분히 이해하고 그 장점을 최대한으로 이용함으로써 지금까지

지와는 크게 다른 개념의 식물공장 즉, 높은 식물제어기능과 생산능력을 겸비하고 시스템의 크기가 콤팩트한 식물공장을 구축할 수 있는 가능성을 기대하고 있다.

- 딸기 재배 : 3,240 ha로 매년 8~10% 경작지가 증가  
2009년부터 매년 10%씩 LED광원을 이용한 전천후 생산시설 교체 계획  
(적색, 청색 LED사용)  
1023m<sup>2</sup>당 약 100대 조명등이 필요
- 잎 양상추 재배 : 현재 일본 전역 40여 군데에서 생산 중  
(1동당 연간 약 200만주 수확)

한편 세계에서 처음으로 식물재배용 인공광원으로 발광다이오드를 이용한 것은 Mitsubashi(주)의 연구 그룹이었다. 이 연구그룹은 1982년이라는 이른 시기에 토마토를 온실에서 재배할 때에 peak파장 650 nm의 적색 발광다이오드를 보광한 연구결과를 보고하였다.

1990년대에는 아직 식물의 재배실험에 필요한 청색광을 충분히 공급하는 고휘도의 발광 다이오드가 개발되지 않은 상태로 실험에 이용할 수 있는 것은 광강도가 매우 낮은 SiC계의 청색 발광다이오드였다. 따라서 청색형광등을 발광다이오드 램프Unit에 겹쳐서 발광다이오드 램프사이를 통해서 식물에 청색광을 공급하였으며 NASA의 연구그룹은 직경 1 cm, 길이 12 cm 정도의 소형 청색 형광등을 발광다이오드 램프사이에 설치하여 청색광량을 조절하는 등의 시도를 하다가 1993년 말에 일본의 Nikka화학(주)에서 고휘도의 청색 발광다이오드를 개발하게 되어 현재까지 청색광이 식물체의 생장 및 형태형성에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되고 있다.

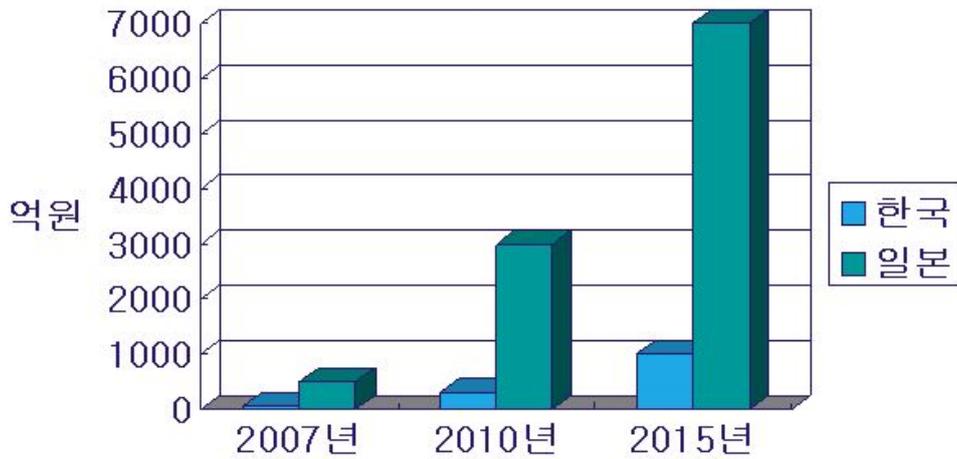
미국에서는 일본의 적색광에 대한 연구결과가 학회에 보고되고 난 후부터 관심을 가지기 시작하여 우주기지 등의 폐쇄형 공간내에서의 생명유지 시스템(CELSS) 관련기술의 하나로 NASA의 연구그룹을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 1987년부터 발광다이오드를 인공광원으로 한 본격적인 재배실험이 Wisconsin대학의 Dr. Tibbitts 등을 중심으로 한 연구그룹에 의해 시작되었으며 주로 상치를 이용한 육묘실험과 재배실험에 대한 연구결과가 보고되고 있다.

발광다이오드 개발의 선두주자인 일본에 비해 미국에서는 Wisconsin대학의 Dr. Bula 등을 선두로 하여 식물체의 생장 및 형태형성에 미치는 청색 및 적색의 발광다이오드에 대한 실험결과에 대하여 주목을 끌기 시작하였다.

한편, 1995년 이후부터는 발광다이오드의 가격이 고가인 점에서 Clemson대학의 Dr. Rajapakse 연구팀을 중심으로 하여 온실조건 하에서 이용하는 유색의 필름을 이용하여 태양광으로부터 공급받는 적색 및 원적색광을 선택적으로 흡수하는 광선택성 필름을 개발하여 이들 필름에 의한 광질 선택이 식물체의 생장 및 형태형성에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되기 시작하였다.

이러한 인공광원을 통한 식물재배 시장은 앞으로 한국과 일본을 중심으로 형성되어 나갈 것이며 그 규모는 한국은 2015년 1000억 원, 일본은 2015년 7000억 원 이상이 될 것으로 전망된다.

## LED 식물재배조명 시장



(source : Landmark(Japan))

그림 4. 식물재배용 LED 광원 시장 규모

### 제 3 절 연구개발에 따른 기대성과

LED의 에너지 절감 및 친환경적인 장점으로 인하여 선진국에서는 이미 LED를 이용한 식물재배 시스템의 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 일반적으로 LED는 에너지 절감 및 친환경적인 광원으로 알려지고 있으며 이에 따라 LED를 적용한 식물재배기에 대한 연구는 국내에서도 일부 이루어지고 있지만, 본 과제에서 제안되는 여러 원천적인 요소 기술이 반드시 구현되고 적용되어야만 LED의 이러한 본질적인 장점이 구현되어 실용화 및 보급화에 필수적인 식물재배기의 단가 및 신뢰성을 확보할 수 있다. 따라서, 본 과제가 성공적으로 수행될 경우, 적절한 확산·보급시스템을 통하여 전통적인 기존등에 대비한 LED등의 전력절감효과와 광합성에 필요한 선택적인 광원공급요소로부터 막대한 에너지 절감효과가 기대되며, 신개념의 고부가가치의 청정·고품위 작물을 적기·적소에 공급할 수 있음으로서 농촌수익의 증대에 크게 이바지 할 것으로 사료된다. 또한 전통적인 농업기술에 최고의 IT기술을 접목한 새로운 산업형태를 창출함으로써 농업사회의 새로운 일자리 창출과 새로운 신개념의 관련 산업을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 고효율 LED 구현을 위한 패키지 설계 및 성능 최적화

#### 1. 식물재배기 인공광원용 LED의 열 성능 평가 기술 개발

반도체 광원으로 불리는 발광다이오드(LED)는 긴 수명과 간편한 유지보수, 높은 휘도와 에너지 효율로 인해 단순한 전자부품 수준을 벗어나 생활조명 뿐 아니라 디스플레이 광원, 의료용 조명, 바이오 조명, 각종 지시등 등에 널리 사용되고 있다. 생활 조명과 차세대 전자제품 광원으로 거듭나고 있는 LED는 에너지 소비량이 기존 백열전구의 단 10분의 1에 불과하고 형광등에서 보편적으로 사용되는 유해물질이 없으므로 에너지절감형, 친환경적 차세대 조명용 소자로 각국에서 치열한 개발경쟁을 벌이고 있는 분야중 하나이다. 국내의 경우는 현재 전력 소비량의 약 18% 정도가 조명 부분에 집중되고 있어 전력 소비를 20%만 감축 시켜도 100만 kW급 발전소 1기의 발전량을 줄일 수 있으며 이는 216만 톤의 이산화탄소와 12,000여톤의 황산화물, 7600톤의 질소산화물의 배출을 막을 수 있어 화석연료 사용에 의하여 야기되는 지구환경 문제도 줄이는데 이바지 할 수 있다. LED 조명 산업이 급부상하는 이유가 바로 이 때문이다.

최근의 LED 조명 산업에서 가장 주목받고 있는 분야는 식물재배용 인공광원으로의 적용이다. LED의 장점은 여러 가지가 있지만 특히 에너지 소비량이 기존 백열전구의 단 10분의 1에 불과하다는 게 특징이며, 형광등에서 보편적으로 사용되는 유해물질이 없으므로 에너지절감형, 친환경적 차세대 조명용 소자로 각국에서 치열한 개발경쟁을 벌이고 있는 분야중 하나이다. 따라서 최근 환경보호 및 에너지 절감이 주를 이루는 “저탄소·녹색성장”이 국가적인 화두로 등장하면서 전력 소모량을 대폭 줄일 수 있고 유해 물질을 배출하지 않는 LED 인공광원에 농업계의 이목이 집중되고 있다.

그러나 LED의 광 방출 향상을 위한 전기적 출력이 높아질수록 LED에서 발생하는 self-heating 문제는 식물재배용 LED 인공광원의 상용화에 있어서 아주 중요한 제작 요소로 인식되고 있다. 특히 p-n접합에서의 열 방출은 단위 칩에서의 효율적인 열 방출이 이루어지지 않을 경우 LED Array 및 응용제품에서의 상품성에 심각한 문제점으로 제기 될 수 있다. 이러한 이유로 효율적인 열 발산을 위한 칩 설계의 중요성이 더욱 증대되고 있다.

세부연구 기관에서는 식물재배용 LED 인공광원 모듈의 본격적인 열 성능 분석 연구에 앞서 고풍력 LED 소자의 열화 기구에 대한 분석을 진행하였다. 연구결과 형광체를 코팅하여 여러 색의 빛을 유도하게 되는 LED 발광소자의 경우 온도가 50℃에 이르면서 발광의 세기가 심하게 감소하는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 제1협동연구 기관 측에 LED 인공광원 모듈의 샘플 제작에 앞서 방열성을 고려해 열전도도가 우수한 PCB를 적용한 제품 디자인 룰을 제시하였다. 이에 따라 제작된 LED 모듈 샘플을 제공받아 열 성능 분석을 진행하였다.

그림 5는 세부연구 기관에서 제시한 디자인 룰에 따라 제1협동기관에서 제작한 LED 인공광원용 모듈 사진이다. 18개의 LED 단일 패키지로 모듈을 구성하여 구동회로 패턴을 실장한 후 모듈의 방열성 향상을 열전도도 특성이 우수한 알루미늄 재질의 PCB를 장착하였다.

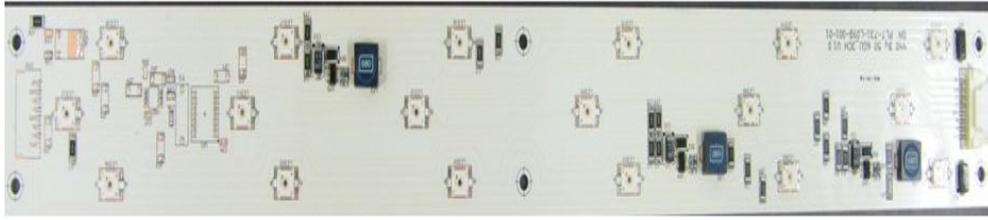


그림 5. LED 인공광원 모듈

그림 5의 LED 인공광원 모듈 샘플에 대한 열 성능을 열천이 측정법과 유한체적법을 통해 분석하였다.

#### 가. 열천이 측정법을 통한 열 특성 분석

일반적인 전자소자의 열 특성 측정방법에는 광학적, 물리적, 화학적 그리고 전기적인 방법 등이 있고 이 중 전기적 측정방법은 비파괴적 정선온도 측정방법이다. 따라서 본 연구에서는 전기적 측정방법의 하나이고 LED 열 특성을 평가하는데 적용이 용이한 열천이 측정법(Thermal Transient Method)을 사용하여 식물재배용 LED 인공광원 모듈의 열적 성능을 분석하였다.

평가과정에서 먼저 K factor와 cooling 곡선을 구하였고 다음 evaluation을 통하여 시간상수를 구하고, deconvolution에 의해 cumulative와 diffusion form 모두로 보이는 구조함수(Structure function)를 구하였다. 이러한 열 저항 측정에 대한 원활한 feedback 과정을 통해 최적화된 LED 모듈의 열 저항 측정 및 결정법을 확립하였다.

열천이 측정에 사용된 시스템의 모식도를 그림 6에 나타내었다. LED 모듈의 열천이 측정은 전류 구동소스, 측정용 스위치, 측정용 강제 냉각 챔버 또는 스틸에어 챔버, DVM(Digital Voltage Meter : 파워 측정 장비), 열천이 측정 채널로 구성되었다. 열천이 측정 장비 구성 시 전자기파 및 온도와 같은 외부 측정 노이즈에 샘플 및 측정 라인이 노출되지 않게 구성하였다.

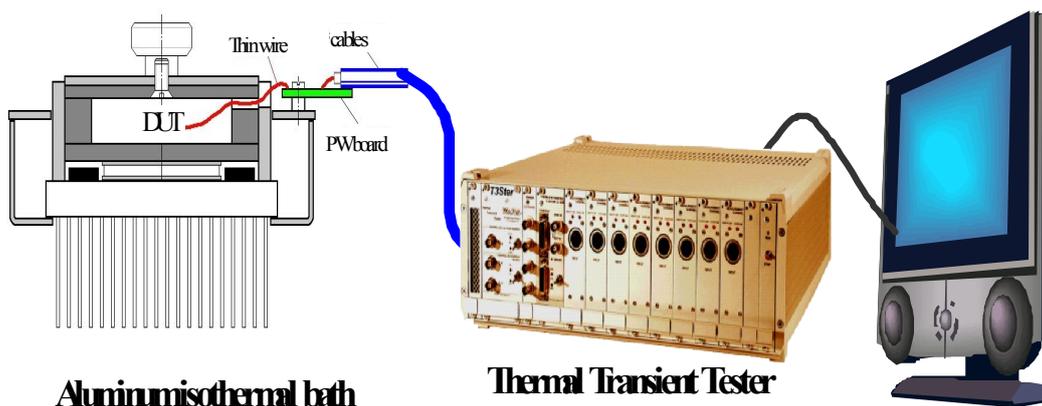


그림 6. 열천이 측정 시스템의 개략도

그림 5의 LED 모듈에 18W의 구동전력을 인가하여 열천이 측정을 수행하였다. 그림 7은 LED 모듈의 열천이 측정법의 재현성을 나타낸 결과이다. 그림 7의 (a)는 주변온도 25℃의 강제냉각 조건에서 LED 모듈의 냉각곡선이다. 이때의 LED 모듈 정선 온도는 47℃(온도상승폭(22℃)+주

변온도(25°C))의 재현성을 보였다. 그림 7의 (b)는 주변온도 25°C의 강제냉각 조건에서 LED 모듈의 구조함수 그래프이다. 구조함수에서 강제냉각 조건 시 LED 모듈의 열 저항은 1.28 K/W의 재현성을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

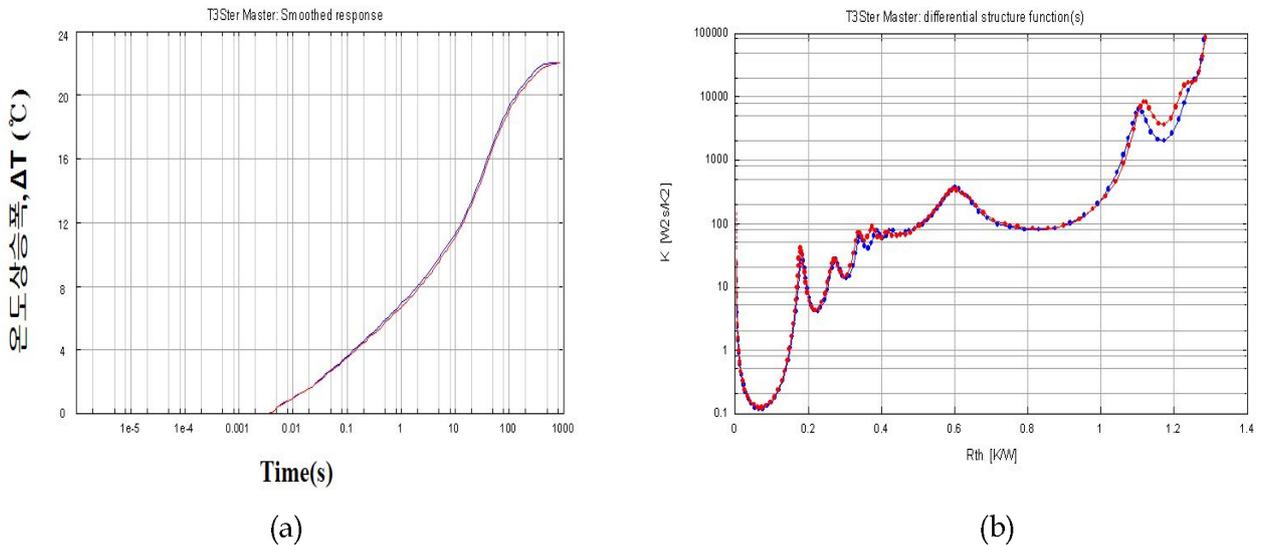


그림 7. 25°C 강제냉각 조건 시 LED 모듈의 냉각곡선(a) 및 구조함수(b)

그림 8은 상온의 자연냉각 조건에서의 LED 모듈의 냉각곡선 및 구조함수를 나타낸 그래프이다. 냉각곡선에서 LED 모듈의 정선 온도는 89°C(온도상승폭(64°C)+상온온도(25°C)), 구조함수에서 LED 모듈의 열 저항은 3.6 K/W임을 확인할 수 있다.

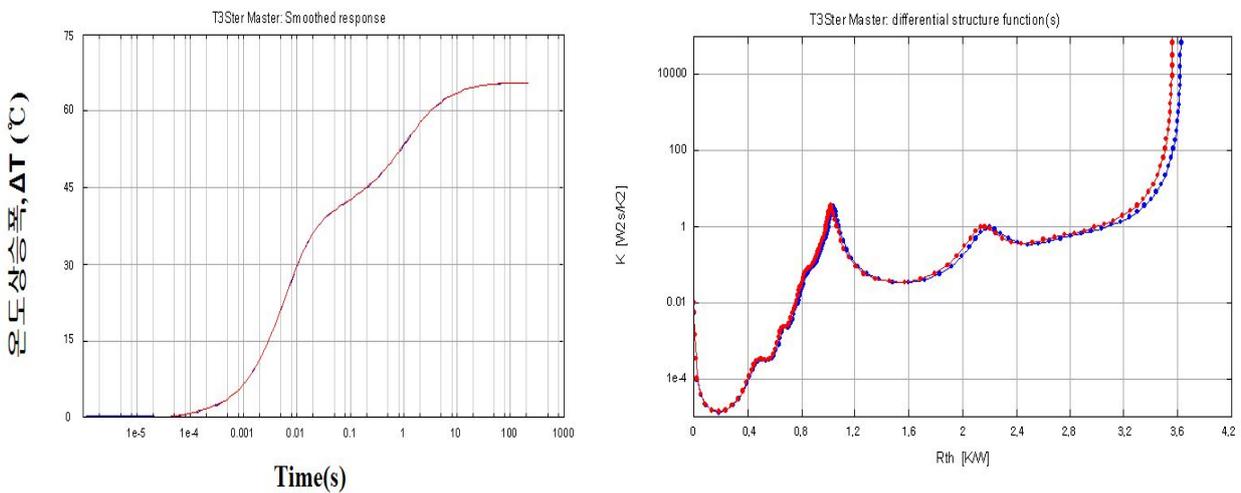


그림 8. 자연냉각 조건 시 LED 모듈의 냉각곡선(a) 및 구조함수(b)

그림 7과 그림 8의 결과를 비교했을 때 냉각조건에 따라 LED 모듈의 열 특성이 다르게 나타났다. 이러한 이유는 냉각 조건에 따라 LED는 각각 다른 열 방출 기구를 가지게 되기 때문이다. LED 내부에서는 전도에 의한 열 거동이 중요한 열전달 기구이지만 LED 표면에서는 공기의 대류에 의한 방열이 중요한 열전달 기구로 작용됨을 보여준다. 즉, 자연냉각 조건에서 열 저항이 더 크게 나타난 이유는 열의 최종적 방열이 강제냉각과 달리 LED 표면과 공기의 대류에 의한 방열로 이루어지기 때문이다. LED의 온도 변화에 따라 전도에 영향을 주는 열전도도

는 크게 변화하지 않는데 비하여 자연냉각에서의 대류 열전달 계수(h)는 온도 변화에 따라 크게 변화하여 방열 성능이 강제냉각에 비해 저하되는 것이다.

#### 나. 열적 시뮬레이션을 통한 열 특성 분석

LED 열 성능 분석에 있어서 무엇보다 중요한 기술 중의 하나는 열적 시뮬레이션이 기술이라고 할 수 있다. 일반적으로 시뮬레이션 기술은 실제 LED 제품의 제작 이전에 가상적인 구조를 이용하여 특성을 분석하고 실제 적용된 구조와 비교·분석함으로써 시뮬레이션의 적용성을 판단하게 되어있다. 이러한 일련의 과정을 통하여 궁극적으로 실제 패키지의 제작비용과 시간을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 열적 시뮬레이션 결과와 실제 샘플의 측정 결과 비교·분석을 통하여 LED 제품의 열 성능 분석 기술의 신뢰성을 향상시킬 수도 있다.

본 연구에서는 유한체적법 (Finite Volume Method)을 적용하여 기존 LED 단일 패키지의 열 분석 방법을 응용하여 개발한 인공광원용 LED 모듈의 열 성능 분석 기술의 신뢰성 분석 및 차후에 논의될 방열 설계 요소를 추출하였다.

열적 시뮬레이션 해석에 사용된 유한체적법(FVM)은 대류를 이용한 열 유동 분석을 위해 복잡하고 다양한 형태의 구조물을 무한개의 체적으로 공간 차분한다. 그리고 질량·모멘텀·에너지 보존법칙에 의해 수치적으로 풀릴 수 있는 대수의 형태를 취하고, 열원에 대해 Navier-Stokes Equations을 구한다. 이를 CFD(Computational Fluid Dynamics)로 변환하여 경계 조건들과의 반복적인 계산을 하며, 대류열전달계수의 순차적 대입, 수렴에 의한 수치적인 근사화를 통해 열전달 해석을 얻어내는 방법이다.

그림 9에 열적 시뮬레이션으로 생성시킨 LED 모듈의 기하학적 모델과 열적 해석을 통한 LED 모듈의 온도구배를 나타내었다. 그림 5의 실제 LED 인공광원 모듈과 동일한 크기와 구조로 생성하였다.

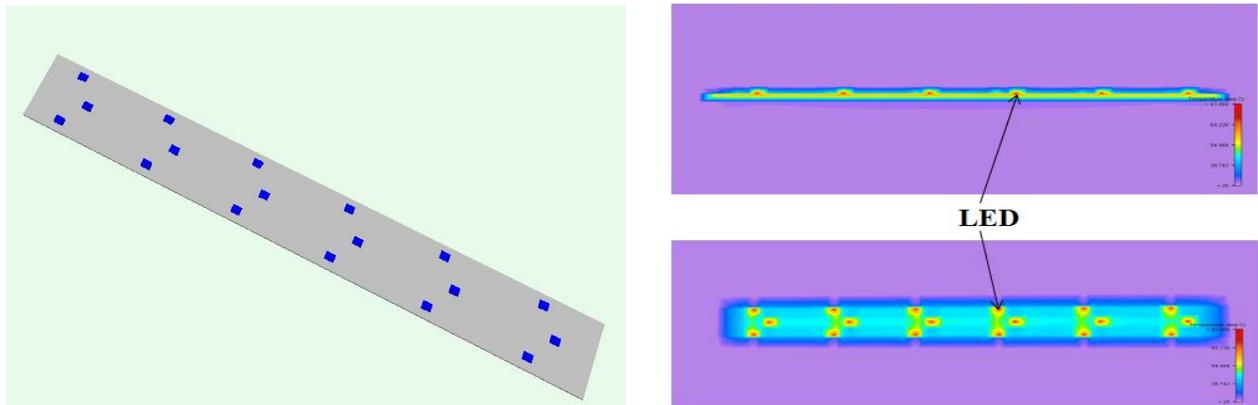


그림 9. 열적 시뮬레이션에서 생성한 LED 모듈의 기하학적 모델(a)과 온도구배(b)

생성된 LED 모듈의 기하학적 모델에 열천이 측정 실험에서의 동일한 물성 및 인가파워, 경계 조건을 지정하여 열 해석을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 LED 모듈의 열 특성 결과를 그림 7, 그림 8에서 나타낸 열천이 측정 결과와 비교하여 그림 10에 나타내었다.

시뮬레이션에서도 측정 결과와 마찬가지로 강제 냉각의 경우 자연 냉각 보다 열 특성이 더 우수하게 나타났다.

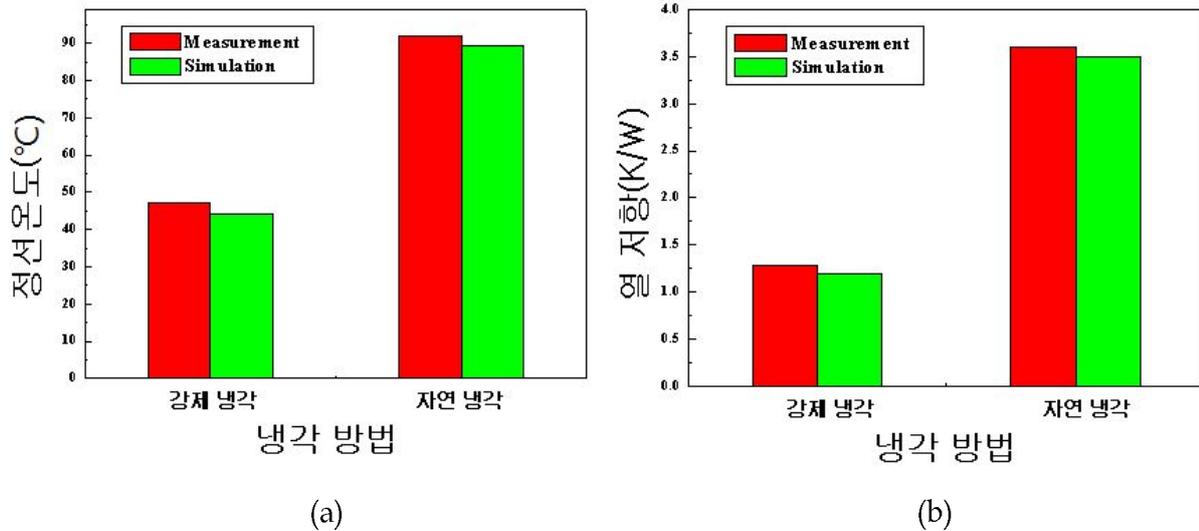


그림 10. 시뮬레이션과 측정에서의 열 특성 분석 결과 : 정선 온도(a), 열 저항(b)

따라서 본 연구에서는 측정 및 시뮬레이션 결과 비교·분석을 통해 LED 인공광원 모듈의 열 특성 분석 기술의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 그리고 차후에 논의할 방열 기술과 관련해서도 우리는 위 결과를 바탕으로 실제 LED 인공광원을 적용하였을 경우 동작의 신뢰성 및 안정성 확보를 위해서는 강제냉각 조건이 자연대류보다 더 유리하다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 강제냉각 시스템이 구축되지 않은 자연대류 시스템의 경우에는 대류 열전달 계수를 향상시키는 방열 구조를 설계하는 것이 우수한 열적 성능을 구현하는데 유리하다는 사실을 확인할 수 있었다.

## 2. 식물재배기 인공광원용 LED의 광 성능 평가 기술 개발

상기의 연구 결과에서도 나타나듯이 자연 냉각보다 강제 냉각 조건에서 LED는 보다 안정적인 열적 성능을 나타낸다. 따라서 강제 냉각 조건 적용을 통해 안정적인 열 성능 확보 상태에 따른 LED 인공광원 모듈을 구성하는 단일 패키지의 광 특성을 분석하였다. 그림 11은 렌즈의 방사각도를 달리한 5개 LED 패키지의 광 방출 사진이고 그림 12에 강제 냉각 시 주변온도와 인가전류에 따른 LED 패키지의 광 특성 분석 결과를 나타내었다. 그림 12의 (a)는 동일한 전류(50mA)를 인가했을 때 주변온도에 따른 LED의 광 특성 변화 결과이다. 동일한 인가전류 하에서 LED의 광도 및 광 출력은 냉각 시의 주변온도가 증가함에 따라 저하되었다. 이러한 결과는 주변온도가 증가함에 따라 전도에 의한 열 전달율이 감소하여 LED 칩으로부터 발생한 열이 외부로 충분히 방출되지 못하고 LED 내부에 남아 광 방출의 방해요인으로 작용하였기 때문이다. 동일한 전류를 인가하고 주변 온도를 변화시켰을 때 LED의 방사각도에 따라서도 광 특성은 다르게 나타났다.

그림 12의 (b)는 주변 온도가 일정할 때 인가되는 전류에 따른 LED의 광 특성 변화 결과이다. 동일한 주변 온도 조건 하에서 LED의 광도 및 광 출력은 인가되는 전류가 증가함에 따라 향상되었다. 그러나 주변 온도가 일정하고 인가되는 전류를 변화시켰을 때 LED의 방사각도 따른 광 특성 차이는 그림 12의 (a) 경우에 비해 작았다.

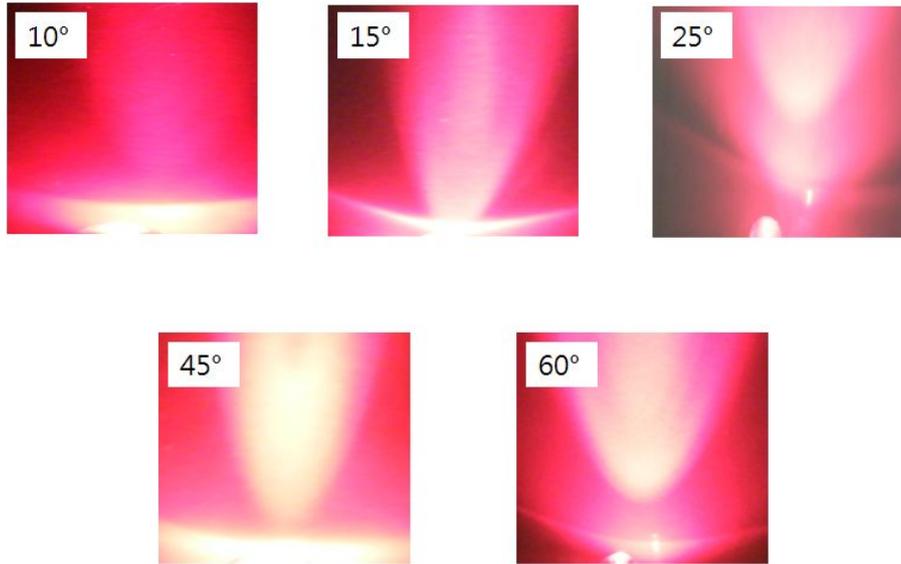
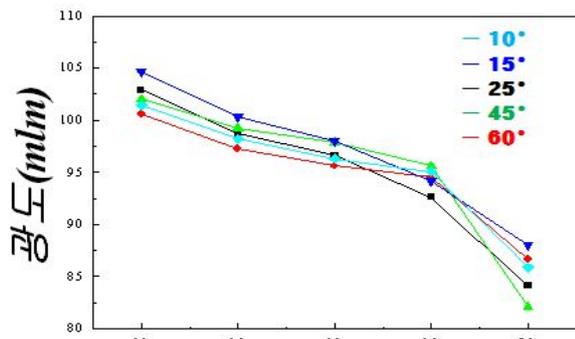
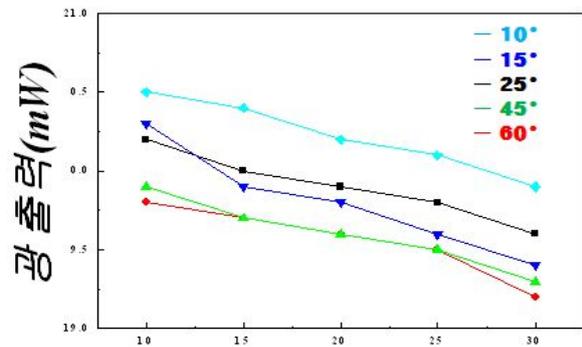


그림 11. 렌즈의 방사각에 따른 광 방출 사진

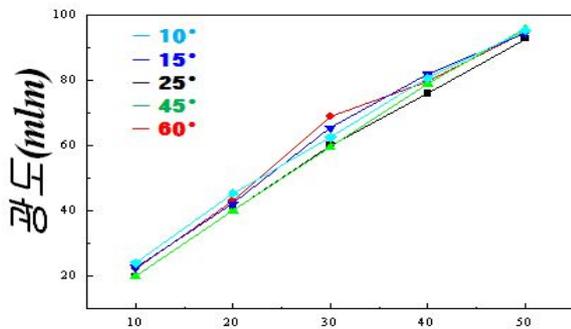


주변온도(°C)  
@50mA의 인가전류

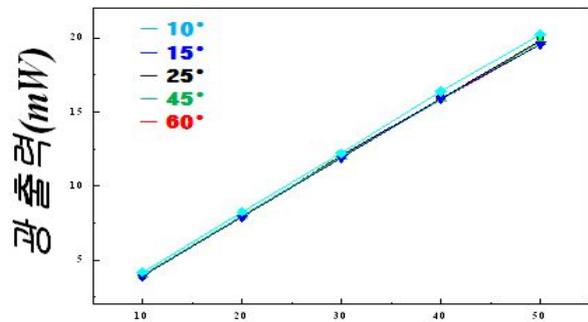


주변온도(°C)  
@50mA의 인가전류

(a)



인가전류(mA)  
@25°C의 주변온도



인가전류(mA)  
@25°C의 주변온도

(b)

그림 12. LED의 주변 온도에 따른 광 특성(a)과 인가 전류에 따른 광 특성(b)

상기의 결과를 통해 방사각도 등의 광학 설계를 통한 LED 광 성능 제어에는 한계가 있고 광학 설계와 더불어 방열 설계 또한 중요하게 고려되어야 할 제작 요소임을 재차 확인할 수 있었다.

### 3. 식물재배기 인공광원용 LED의 방열 설계 기술 개발

LED의 경우 형광등이나 나트륨램프 등의 기존 광원과 달리 전면발열이 아닌 후면발열이 일어나기 때문에 식물에 대한 근접 조사가 가능한 장점이 있다. 그러나 LED에서 일어나는 후면 발열을 제어해 주지 않으면 LED 구동 성능이 저하되고 최악의 경우 소자의 파괴가 일어나게 된다. 따라서 LED 모듈을 식물재배기 인공광원으로 적용하기 위해서는 열에 의한 영향을 최소화 시켜 최적의 광 성능을 구현하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 방열 기술을 설계하였다.

#### 가. 모듈을 구성하는 LED 패키지 레벨에서의 방열 설계 요소 추출

LED에서의 열의 발생은 LED 패키지 내의 칩에서 이루어지기 때문에 LED 패키지 자체에서의 방열 설계가 우선시 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한체적법을 통해 모듈을 구성하는 LED 패키지의 방열 조건에 따른 열 특성 변화 추이를 분석하였다.

그림 13 (a)는 인공광원용 LED 모듈을 구성하는 단일 LED 패키지의 방열경로를 도시한 그림이고 (b)는 열 모델링을 한 후 LED 패키지의 온도구배를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 강제 대류 조건하에서는 LED 패키지의 열은 칩에서 생성된 후 slug를 통하여 전도되고 최종적으로는 대류에 의해 열이 전달된다.

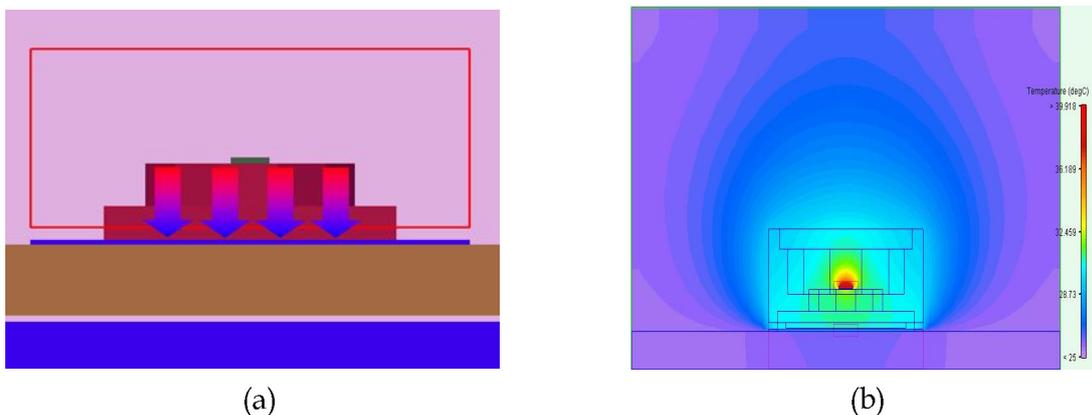
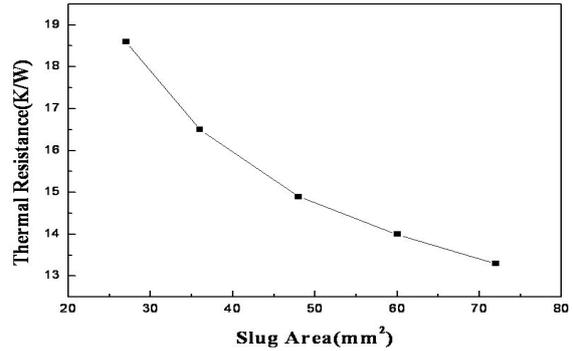
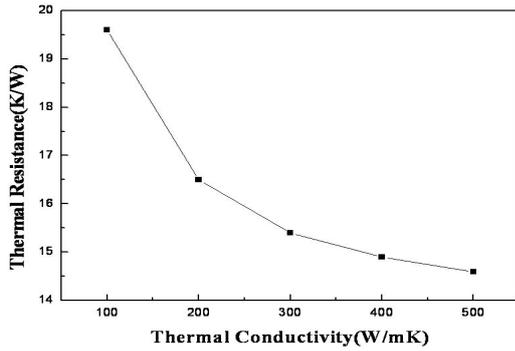


그림 13. LED 패키지의 방열경로(a)와 시뮬레이션 된 LED 패키지의 온도구배도 (b)

그림 14의 (a)는 강제 냉각 조건에서 LED 패키지의 slug 물질의 열전도도를 변화시켰을 때 LED 패키지의 열 저항의 변화를 표시한 그래프이다. 그림으로부터 물질의 열전도도가 크면 클수록 열 저항이 비례적으로 줄어들며 열전도도가 일정하게 좋아지면 그 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다.



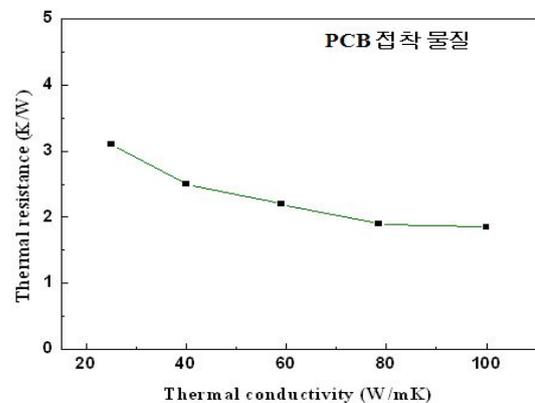
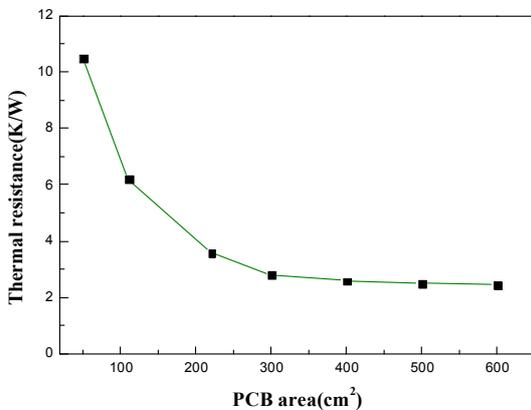
(a) (b)  
그림 14. Slug의 열전도도(a) 및 면적(b)에 따른 열 저항의 변화

그림 14의 (b)는 강제 냉각 조건에서 LED 패키지의 slug의 면적을 변화시켰을 때 열 저항의 변화를 표시한 그래프이다. 그래프로부터 면적에 비례하여 열 저항이 작아지는 것을 알아 낼 수 있다. 이는 열 저항이 물질의 열전도도와 면적에 반비례함을 증명해 주고 있다. Slug의 면적을 무제한 크게 해야 열을 잘 전달되는 것이 아니고 일정한 크기이후에는 더 이상의 효과를 볼 수 없다는 것을 알 수 있다.

#### 나. LED 모듈 레벨에서의 방열 설계 요소 추출

LED 패키지에서 1차적으로 방출된 열은 2차적으로 LED 모듈 전체로 전달이 된다. LED 패키지로부터 전달된 열을 외부로 방출시키지 않으면 모듈을 구성하는 요소의 오작동 및 파괴 등을 야기한다. 따라서 LED 모듈의 안전한 구동을 위해서는 모듈 레벨에서의 방열 설계 또한 반드시 고려되어야 할 부분이다.

그림 15의 (a)는 자연 냉각 조건의 LED 모듈에서 PCB의 면적을 변화시켰을 때 유한체적법으로 분석한 열 저항 변화 그래프이다. 패키지 레벨에서와 동일하게 PCB 면적, 즉, 방열 면적이 증가함에 따라 열 저항은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 열 저항이 방열 면적에 반비례함을 증명해 주고 있다. 그러나 일정한 크기 이후에는 PCB의 면적을 증가시켜도 더 이상의 효과를 볼 수 없다는 것을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 15. PCB 면적(a) 및 접착물질의 열전도도(b)에 따른 LED 모듈의 열 저항 변화

그림 15의 (b)는 자연 냉각 조건의 LED 모듈에서 PCB와 케이스 사이의 접착 물질의 열전도도를 변화시켰을 때 LED 모듈의 열 저항 변화를 유한체적법을 통해 분석한 결과이다. 그림으로부터 물질의 열전도도가 크면 클수록 열 저항이 비례적으로 줄어들며 임계점을 지나면 열전도도가 증가해도 그 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다.

따라서 실제 LED 패키지 및 모듈의 적용에 있어 구성 요소들의 방열 면적 및 열전도도 특성의 최적화가 중요할 것으로 사료된다.

#### 다. LED 인공광원 장치 레벨에서의 방열 설계 요소 추출

LED 모듈을 식물재배 장치에 적용하기 위해서는 별도의 장착 구조 또한 설계되어야 한다. 장착 구조 설계 시 가장 우선시 되어야 할 것은 LED 모듈이 직접 장착될 케이스이다. 따라서 두 가지 케이스 구조를 설계한 후 실제 제작에 앞서 유한 체적법을 통한 열적 시뮬레이션으로 열 특성 변화 추이를 분석하였다. 그림 16에 유한 체적법으로 생성한 두 가지 형태의 방열 케이스 모습을 나타내었다. 각각의 케이스는 하단부가 판형과 heatsink형 구조를 갖도록 설계되었다.

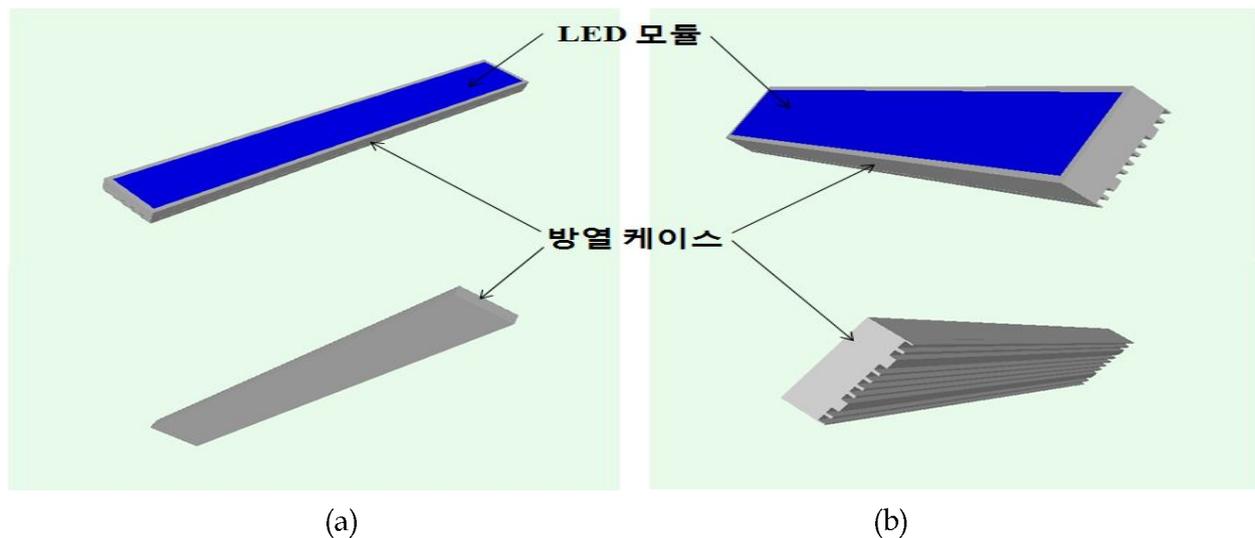


그림 16. 유한체적법으로 생성한 방열 케이스 모델 : 판형(a), Heatsink형(b)

LED 모듈을 두 가지 구조의 방열 케이스에 장착시킨 후 자연 냉각 조건에서 열적 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 17에 열적 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 LED 모듈만을 자연 냉각 조건에서 적용했을 때 보다 케이스에 장착하여 적용했을 경우가 우수한 열 특성을 보였다. 판형의 하단부 구조를 갖는 케이스의 경우 LED 모듈만을 적용했을 때 보다 26.2℃의 정선 온도 감소 효과를 보였으며 heatsink형의 하단부 구조를 갖는 케이스의 경우 36.6℃의 정선 온도 감소 효과를 나타냈다. 열적 시뮬레이션을 통해 케이스 적용에 따른 열 특성 향상 효과를 확인한 후 제1협동기관과의 협력을 통해 두 가지 형태의 케이스를 직접 제작하였다.

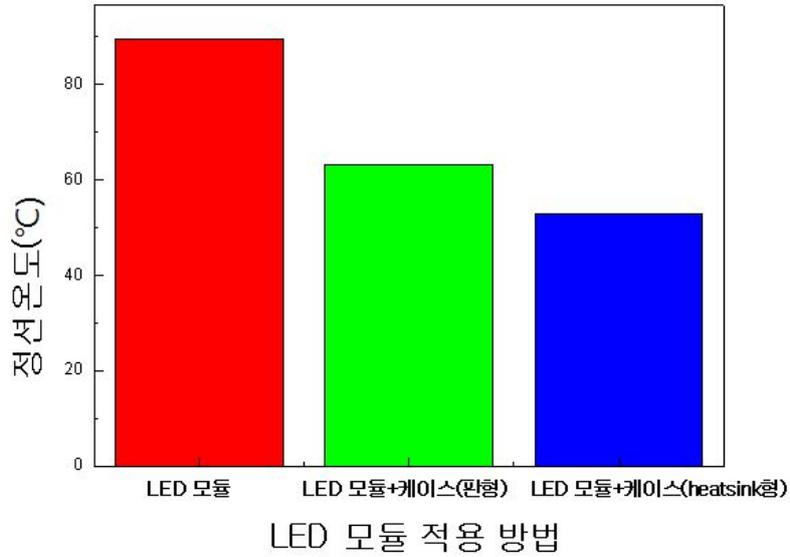


그림 17. LED 모듈 적용 방법에 따른 열적 시뮬레이션 결과

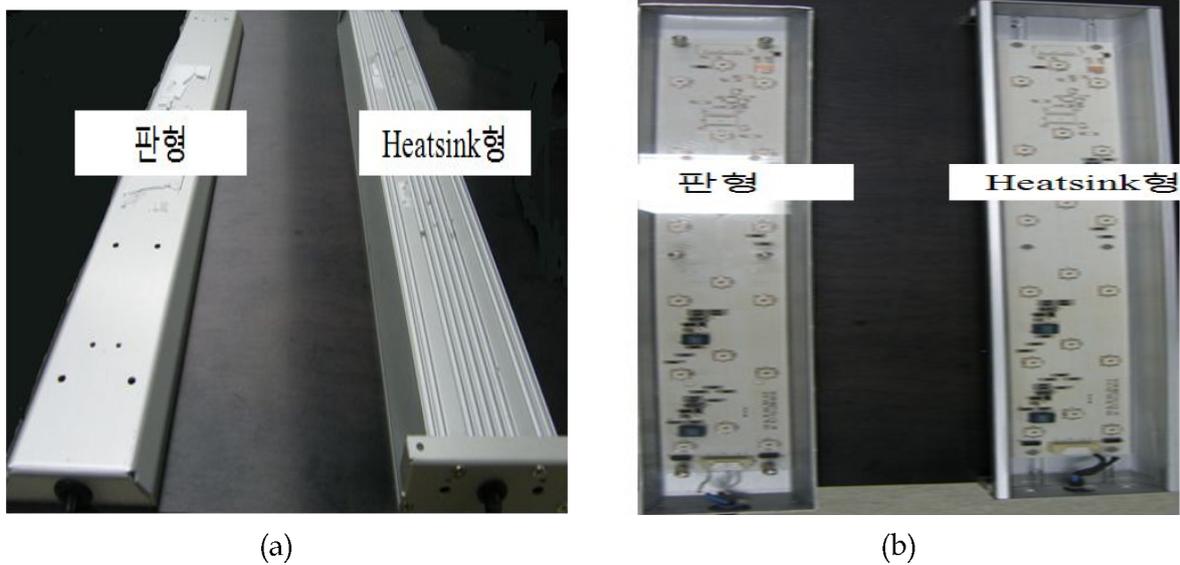


그림 18. LED 모듈의 방열 케이스 : 케이스 하단부(a), LED 모듈 장착 모습(b)

그림 18은 제1협동기관과의 협력을 통해 제작한 방열 케이스 사진이다. 두 가지 구조의 방열 케이스에 LED 모듈을 장착한 후 자연냉각 상태에서 열천이 방법을 통한 열 특성을 분석하였다. 그림 19에 앞서 수행한 열적 시뮬레이션과 열천이 측정 결과를 비교하여 나타내었다.

그림 17과 그림 19의 결과에서 확인할 수 있듯이 LED 모듈만을 적용했을 경우보다 케이스에 장착하여 적용한 경우가 열적으로 유리한 결과를 보였다. 또한, heatsink형의 하단부 구조를 갖는 방열 케이스에 LED 모듈을 장착한 경우가 판형 하단부의 구조를 갖는 방열 케이스에 장착한 경우보다 더 우수한 방열 성능을 보였다. 이러한 결과는 판형에 비해 heatsink형이 공기와의 접촉면이 증가하여 대류에 의한 열전달이 효율적으로 이루어졌기 때문이다.

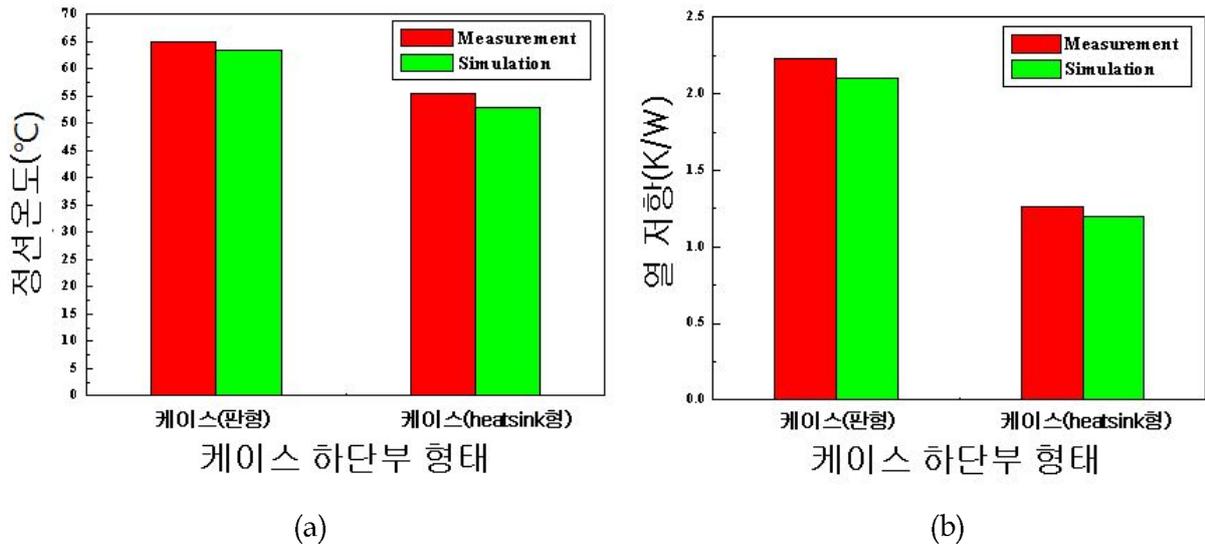


그림 19. 방열 케이스 구조에 따른 LED 모듈의 열 특성 : 정선 온도(a), 열 저항(b)

#### 4. 방열 설계 기술이 접목된 식물재배용 LED 인공광원의 열 특성 분석

식물재배용 LED 인공광원에서의 방열 기술의 효율성을 검증하기 위해 LED가 각각 18개, 24개가 장착된 모듈을 적용하였다. 2개의 LED 모듈 각각에 앞서 추출하여 제안한 방열 요소 중 fin의 개수를 달리한(5개, 10개) 케이스를 장착한 경우의 열 특성을 열천이법을 통해 비교·분석하였다. 그림 20은 각각 18개와 24개의 LED가 장착된 모듈이 케이스에 부착된 모습이다.



(a)

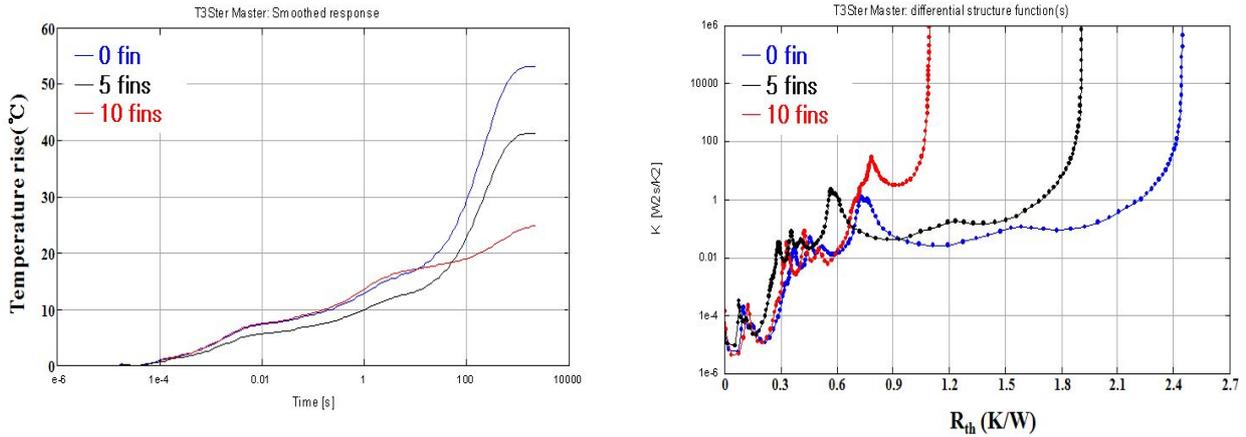


(b)

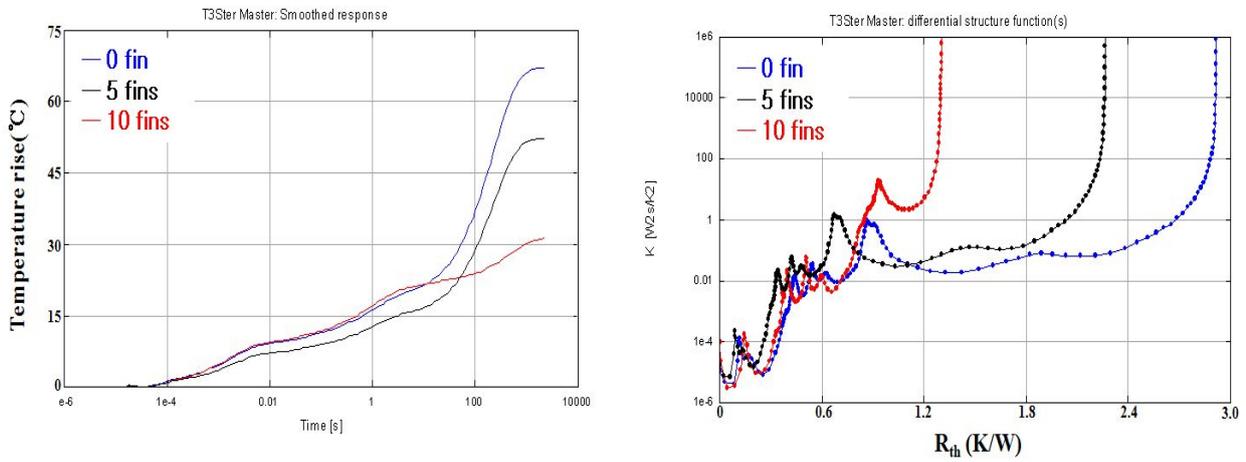
그림 20. (a) 18개의 LED가 장착된 모듈과 (b)24개의 LED가 장착된 모듈

그림 21은 fin의 개수에 따른 열 특성 변화를 나타낸다. Fin의 수가 증가함에 따라 정선 온도와 열 저항 모두 현저하게 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 fin을 적용함으로써 LED 모듈의 열

성능이 향상된다는 상기의 모델링 결과와도 일치하므로 그 효용성이 검증되었다고 사료된다.



(a)



(b)

그림 21. Fin의 개수에 따른 열 특성 변화 (a) 18개 LED 모듈 (b) 24개 LED 모듈

### 5. 식물재배용 LED 인공광원의 정량적 열 특성 분석 기술 개발

#### 가. LED 광원의 온도감응계수 도출

온도에 따른 전압 변화를 나타내는 온도감응계수(Temperature Sensitive Parameter, TSP)는 LED 패키지의 전기적 연결 형태에 따라 변화한다. 일반적으로 LED의 TSP는 다음과 같은 식에 의해 구한다.

$$I_F = I_S \left( \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

$$\frac{V_F}{T} = \frac{k}{q} \ln\left(\frac{I_F}{I_S}\right); \text{constant} \Rightarrow TSP(K) = \frac{dV_F}{dT}$$

그림 22는 단일 LED, n개의 LED가 병렬, n개의 LED가 직렬일 경우의 등가전기회로를 나타낸 그림이다.

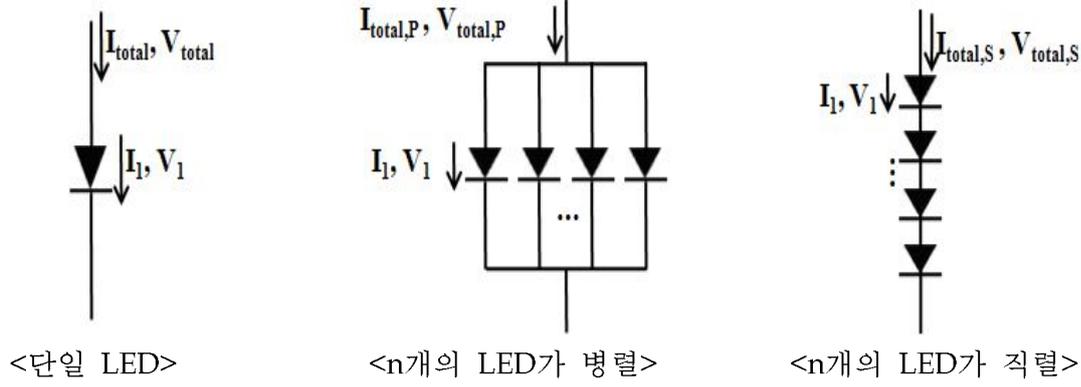


그림 22. LED의 전기적 연결 형태에 따른 등가전기회로

단일 LED일 경우 TSP는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 V_{total} &= V_1 \Rightarrow dV_{total} = dV_1 \\
 \therefore K_1 &= \frac{dV_{total}}{dT} = \frac{dV_1}{dT} \quad (2)
 \end{aligned}$$

n개의 LED가 병렬일 경우 TSP는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{total,P} &= V_1 \Rightarrow dV_{total,P} = dV_1 \\
 \therefore K_P &= \frac{dV_{total,P}}{dT} = \frac{dV_1}{dT} \quad (3)
 \end{aligned}$$

n개의 LED가 병렬로 연결되어 있는 경우 전체의 전압은 1개의 LED에 인가되는 전압과 같으므로 TSP는 단일 LED의 경우가 동일하다.

n개의 LED가 직렬일 경우 TSP는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{total,S} &= n \cdot V_1 \Rightarrow dV_{total,S} = n \cdot dV_1 \\
 \therefore K_S &= \frac{dV_{total,S}}{dT} = \frac{n \cdot dV_1}{dT} \quad (4)
 \end{aligned}$$

n개의 LED가 직렬로 연결되어 있는 경우 전체 전압은 1개의 LED에 인가되는 전압의 n배가 되므로 TSP 또한 단일 LED 경우의 n배가 된다.

본 연구에서 사용한 LED 모듈이 경우 총 18개의 LED 패키지가 장착되었고 3개의 LED 세트는 병렬로, 1개의 LED 세트는 6개의 LED 패키지가 직렬로 연결되어 있다. 그림 23에 본 연구에서 사용한 LED 모듈의 등가전기회로를 나타내었다.

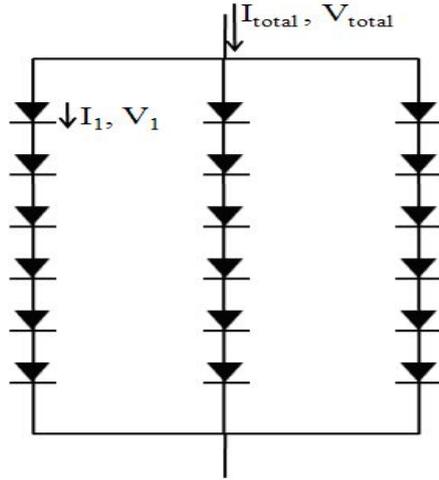


그림 23. LED 모듈의 등가전기회로

1개의 LED 패키지에 인가되는 전류, 전압은 각각 0.6A, 2.93V이다. 따라서 전체 LED 모듈에 인가되는 전류, 전압의 계산값은 각각 1.8A, 17.53V이고 실제 측정값은 1.8A, 17.64V였다. 1개의 LED 패키지와 전체 LED 모듈의 측정 TSP 값은 각각 0.051mV/°C, 0.320mV/°C로 전체 LED 모듈의 TSP 값이 1개의 LED 보다 6배가 됨을 확인할 수 있다. 이는 식 (4)에서 정의한 내용에 부합하는 결과이다.

#### 나. 멀티 패키지 LED 모듈의 열 저항 도출

LED 광원의 경우 단일 패키지가 멀티 패키지 형태로 장착된다. 따라서 멀티 패키지가 장착된 모듈 설계는 실제로 LED 광원 제작에 아주 중요한 기술이다. 실제로 LED 패키지의 열 특성(열 저항)은 기본적으로 낮은 값을 가져야 한다. LED 칩의 열 특성이 아무리 우수하더라도 이러한 LED 칩을 장착한 단위 패키지의 열적 설계가 열악하다면 우수한 LED 칩 수명 보장 불가능하다. 그리고 우수한 방열 설계가 되어있는 단위 LED 패키지라 하더라도 패키지를 장착한 시스템의 열적 구조가 열악하다면 이의 수명도 칩이나 단위 패키지의 성능과 관계없이 단축된다. LED 광원의 방열 설계 기술에서 이러한 멀티 패키지 설계기술은 대단히 중요한 의미가 있고 본 연구에서는 정량적인 분석을 통하여 멀티 패키지의 설계 룰(design rule)을 설정하고 이를 실제 모듈 설계에 적용하여 열 특성을 분석하였다.

본 연구에서 적용한 단일 LED 패키지의 열 저항은 10 °C/W 미만의 낮은 열 저항을 갖는다. JEDEC 표준에서는 단 하나의 열 소스만 있을 때의 열 저항에 관한 규격이 있는데 열 저항의 개념은 전기 회로에서 저항의 개념과 유사하게 정의한다.

$$\theta_{J,REF} = \frac{T_J - T_{REF}}{P} = \frac{\Delta T_{J,REF}}{P} \quad (5)$$

- $\theta_{J,REF}$ : 정선으로부터 기준점까지의 열 저항
- $T_{REF}$ : 기준온도
- $T_J$ : 정선온도
- $P$ : 생성된 열량

여기에서 기준점은 주변공기, 기판, 혹은 패키지의 케이스 등 모두 가능하다. 이 공식을 멀티 LED 패키지에 사용하기 위하여 다음과 같이 수정한다.

$$\theta_{ja-avg} = \frac{T_{j,avg} - T_{amb}}{Q} \quad (6)$$

멀티 LED 패키지내의 열 저항의 변화를 그림 24에 나타난 열적 등가회로로부터 분석하였다.

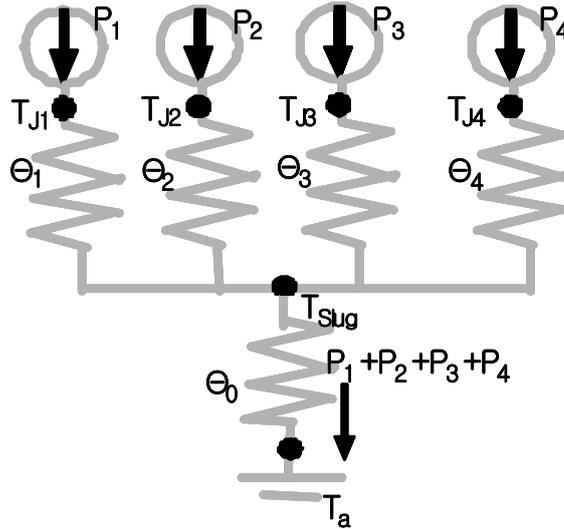


그림 24. 4개의 LED 패키지의 열적 등가회로

일차원적 방향으로의 열전달 경로로 가정할 때 멀티 패키지는 공동 MCPCB 위에 장착되고, MCPCB의 온도는 같다고 가정한다. 정선과 주변과의 온도차는 장착 된 패키지의 수에 따라 다음의 식과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \Delta T_{Ji,a} &= \Delta T_{Ji,slug} + \Delta T_{slug,a} \\ &= P_{ti} \cdot \theta_i + \left( \sum_{k=1}^4 P_k \right) \cdot \theta_0 = P_{ti} \cdot \theta_i + P_{total} \cdot \theta_0 \end{aligned} \quad (7)$$

- $\Delta T_{Ji,a}$  : i 번째 패키지와 주변과의 온도차
- $\Delta T_{Ji,slug}$  : i 번째 패키지와 슬러그 사이의 온도차
- $\Delta T_{slug,a}$  : 슬러그와 주변과의 온도차
- $P_{ti}$  : i 번째 패키지의 소비열량
- $\theta_i$  : i 번째 패키지와 슬러그 사이의 부분 열 저항
- $\theta_0$  : 슬러그와 주변까지의 부분 열 저항
- $P_{total}$  :  $P_i$  의 합계

따라서, 전체 멀티 패키지의 열 저항은 다음과 같이 표현한다.

$$\theta_{total} = \frac{\Delta T_{Ji,a}}{P_{total}} = \frac{P_{ti} \cdot \theta_i + P_{total} \cdot \theta_0}{P_{total}} \quad (8)$$

위 식에 따라 4개의 패키지라고 가정할 때, 전체 모듈의 열 저항은 다음 식과 같이 단순화가 가능하다.

$$\theta_{total} = \frac{\frac{1}{4} P_{total} \cdot \theta_i + P_{total} \cdot \theta_0}{P_{total}} = \frac{1}{4} \theta_i + \theta_0 \quad (9)$$

전체 열 저항은  $1/4\theta_i$  ( $\theta_i = \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ ) 와  $\theta_0$  의 합이다. 패키지의 개수가 늘어나면 전체 열 저항은 감소하고 정선에서 MCPCB까지의 열 저항은 패키지의 수에 반비례한다.

열 저항은 전기저항과 유사하다. 4개의 패키지 사용은 열 흐름 영역에서 면적이 4배 증가하는 것으로 간주하고, 2개의 패키지는 2배 증가한다. 이것으로부터 멀티 패키지 소자의 중요한 열적 디자인 룰을 발견하였다. 부분 열 저항  $\theta_i$  와  $\theta_0$  의 변화가 전체 열 저항 값을 변화시킨다. 여기서  $\theta_i$  는 멀티 패키지에서 공동 부분까지 각각의 패키지 열 저항으로 고려한다. 또한, 멀티 패키지에서의 열 저항은 부분 열 저항  $\theta_i$  와  $\theta_0$  의 비율관계에 의하여 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$R_{th} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\theta_i}} + \theta_0 \quad (10)$$

다. Super Position Method를 통한 각각의 LED 패키지의 정선 온도 예측

멀티 칩 LED 패키지에서 각 칩의 정선 온도를 예측하는 super position method를 멀티 패키지의 LED 모듈에 확장·적용할 경우 모듈을 구성하는 각각의 LED 패키지의 정선 온도를 예측할 수 있다. Super position method를 통한 LED 패키지의 정선 온도 예측 과정은 다음 식 (11)과 같다.

$$T_j = \begin{pmatrix} T_{j1} \\ \vdots \\ T_{jn} \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix}, \theta = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \dots & \theta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{n1} & \dots & \theta_{nn} \end{pmatrix} \xrightarrow{T_j = \theta \cdot P + T_a} \begin{bmatrix} \theta_{11} & \dots & \theta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{n1} & \dots & \theta_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{j1} \\ \vdots \\ T_{jn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

n개의 칩으로 구성된 멀티 칩 LED 패키지의 경우  $\theta_{ij}$ 는 j번째 칩을 구동하였을 시 i번째 칩의 열 저항이고  $T_{j\#}$ 는 i번째 칩의 정선 온도이다.

이것을 n개의 패키지로 구성된 멀티 패키지 LED 모듈로 확장할 경우  $\theta_{ij}$ 는 j번째 패키지를

구동하였을 시  $i$ 번째 패키지의 열 저항이고  $T_{ji}$ 는  $i$ 번째 패키지의 정선 온도가 된다. 이 방법을 통해 LED 모듈을 구성하는 각각의 패키지의 열 특성을 분석하여 효율적인 방열 설계 기술 개발이 가능하다고 사료된다.

## 6. 열적 noise를 고려한 LED 광원의 광 성능 분석

조명용 광원의 LED 경우 일반적인 전자소자패키지와 달리 인입되는 전기적 에너지는 열 에너지 이외에도 빛을 통한 에너지 방사회로를 포함하며 광 효율이 증가할수록 이에 대한 의존도가 증가하게 되어 광 출력에 따른 에너지 소모를 고려되지 못한 정선 온도 및 열 저항 측정값은 사용되어진 측정방법에 따라 결과의 현저한 차이를 야기 시키게 된다. 정확하지 못한 특성값은 대량생산 과정에 있어서 불량 제품을 야기해 큰 손실을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식물재배용 LED 인공광원의 열-광 성능 통합 측정 시스템을 구현하여 열적 noise를 고려한 정확한 광 특성을 분석하였다. 그림 25에 2개의 모듈로 구성된 LED 광원의 모습을 나타내었다. 그림 25의 LED 광원은 TIM 및 heat sink 등의 방열 설계 기술을 적용하여 제작되었다.

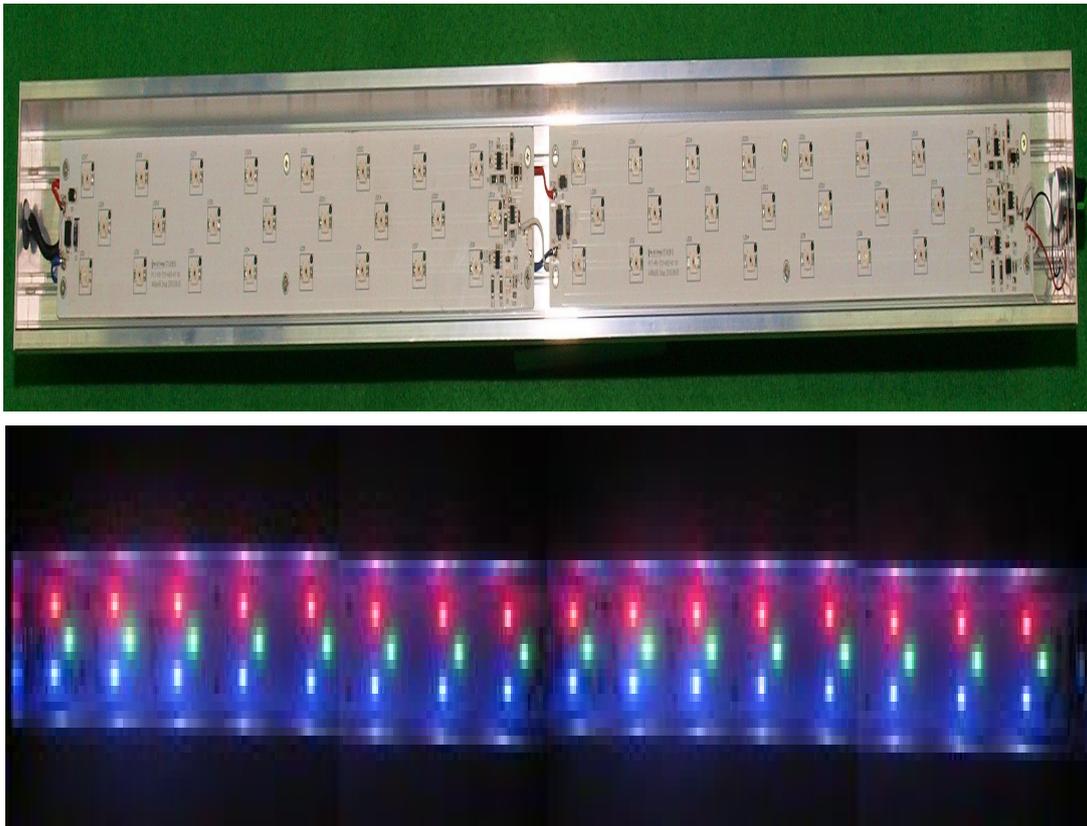


그림 25. 48개 LED가 장착된 광원

그림 26은 본 연구에서 구현된 열-광 통합 측정 시스템의 모식도이다.

열-광 통합 측정 시스템을 통해 식물재배용 LED 인공광원의 열 특성과 광 특성의 상관관계를 분석하였다.

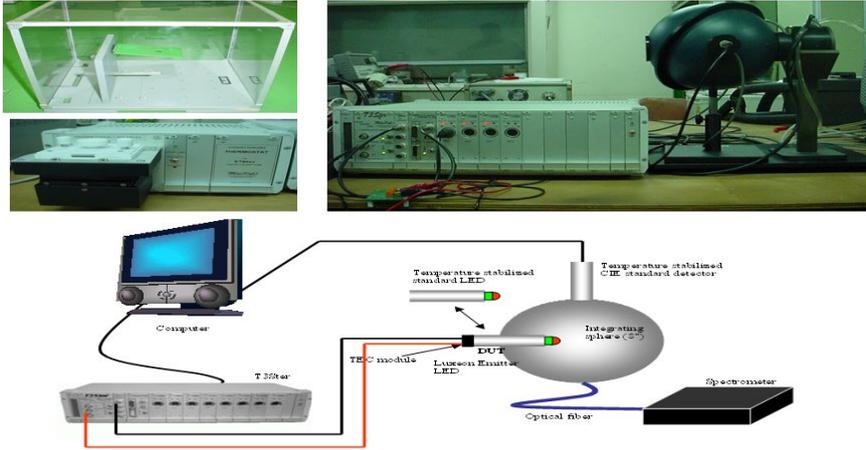


그림 26. 열-광 통합 측정 시스템

그림 27은 heat sink의 fin 개수에 따른 광 특성 변화를 나타낸다.

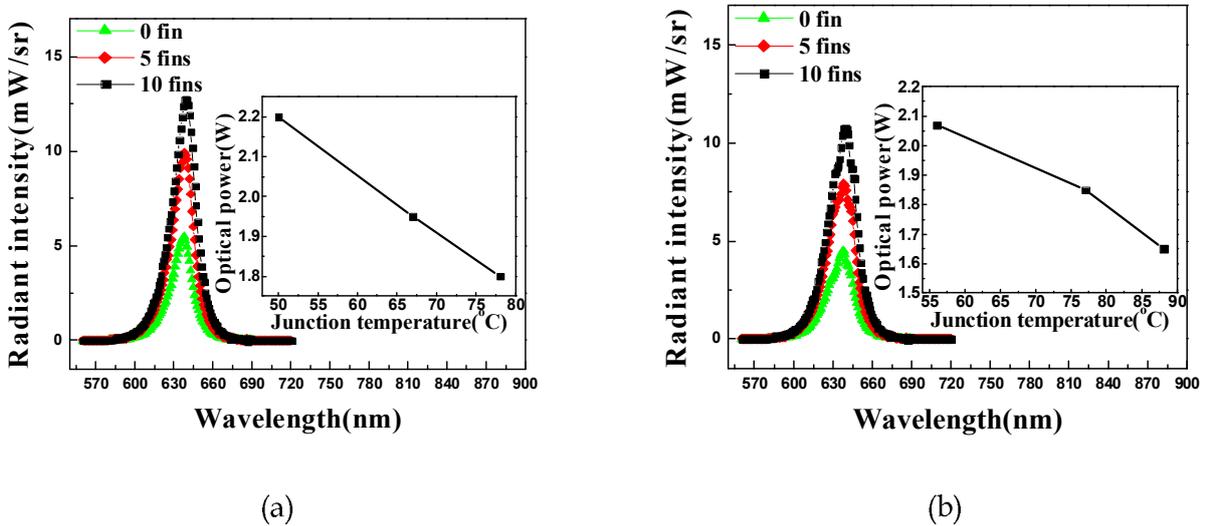


그림 27. fin의 개수에 따른 광 특성 변화 (a) 18개 LED 모듈 (b) 24개 LED 모듈

LED와 같은 광 소자의 경우 열 특성은 광 특성과 깊은 연관이 있다. 광 소자에 전기적 에너지가 인가되면 전기적 에너지는 광학적 에너지와 열적 에너지로 분리되는데 열로 변환되는 에너지가 적어야 최적의 광 특성을 구현할 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 식물재배용 LED 광원의 열 특성과 광 특성의 상관관계 정립을 위해 정선 온도 변화에 따라 구현되는 빛의 특성 변화를 살펴보았다.

그림 27에서 정선 온도에 따라 구현되는 파장 및 광출력, 복사강도가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 원하는 특성의 빛을 구현하기 위해서는 효율적인 방열 설계 적용으로 인한 열 성능 안정화가 우선되어야 함을 알 수 있었다. 즉, 안정적인 열 성능이 확보된 제품일수록 구현되는 광 성능 또한 안정적인 것이다. 그러므로 본 연구에서 개발·확립된 식물재배용 LED 광원의 열 특성 분석 및 열 설계 기술은 시제품의 상용화를 위한 기술 경쟁력 확보를 가능케 할 것으로 기대된다.

## 제 2 절 식물재배기용 고효율 LED 모듈 및 구동회로 설계 · 제작

### 1. DC 24V 전용 정전류 제어용 리니어 드라이버 기술 개발

LED 모듈 구동에 있어 DC 12V 이상을 사용하기 위한 회로나 IC는 손쉽게 구축할 수 있으나, 15V 이상의 소자는 워낙 고가이고, 대부분이 스위칭 소자로만 공급하고 있어, 본 연구에서 요구하는 기준에 맞지 않는다. 그리고 현재 드라이버 IC는 전량 해외에서 수입하고 있으며, 기능이나 성능이 조명과는 다소 거리가 먼 휴대폰 카메라 플래시, 자동차 등으로 한정되어 있어 제대로 적용하기가 어려웠다. 이에 따라 본 연구에서는 저가로 대량 생산할 수 있는 IC를 개발하였다.

그림 28은 본 연구를 통해 설계 · 제작된 LED 구동 드라이버의 회로도이다. 드라이버는 DC24V에서 REF 저항에 의해 전류는 350mA 2개의 채널로 구성하여 700mA까지 자유로이 설정할 수 있게 하였다. 그림 29에 본 연구에서 개발한 드라이버 내의 REF 저항과 전류간의 상관관계를 나타내었다.

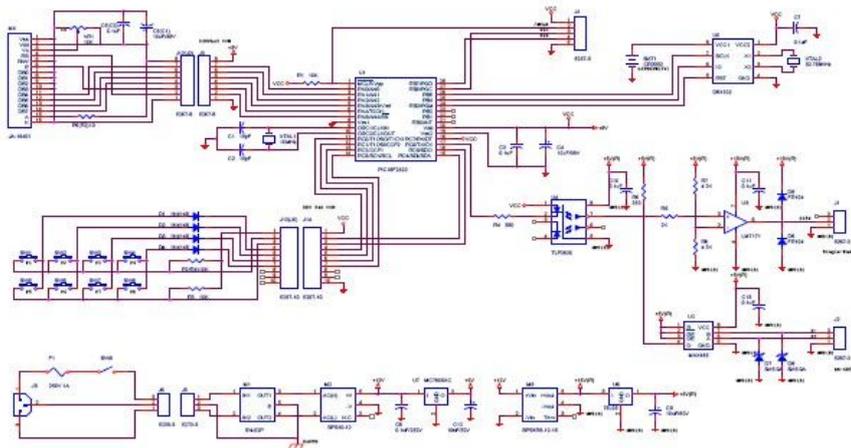


그림 28. LED 인공광원 모듈 구동 드라이버의 회로도

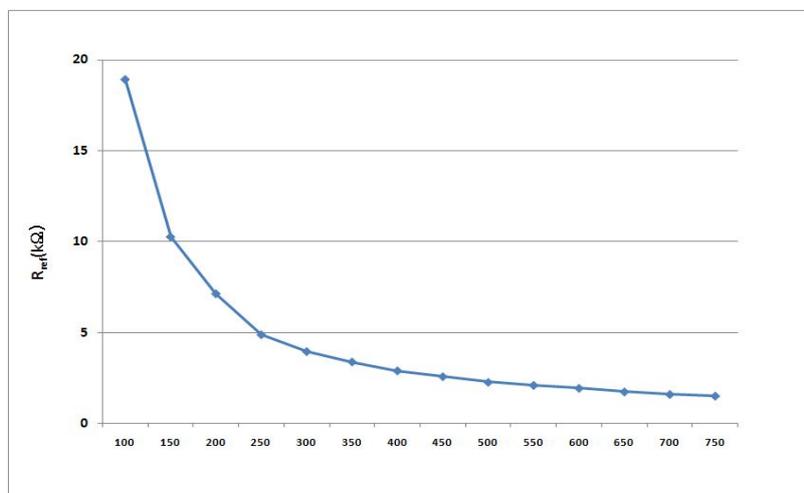


그림 29. REF 저항과 전류의 상관관계

그리고 MICOM에 의한 정전류(Pulse Width Modulation, PWM) 제어가 가능하고 내압은 30V 이상 견딜 수 있도록 설계되었다. 초기 드라이버 회로 설계 시 정전기 발생으로 인해 IC가 파손되는 클레임이 산발적으로 발생하였으나 IC제조업체와의 협력을 통해 문제점을 개선하여 LED Module에 전원인가 순간 시 마이컴에 의한 지연회로가 없는 경우 펄스 전압 파형이 통상 12V용 IC에서는 순간 최대 펄스전압을 17V(정격전압의 40%)까지 보장하게 되었다. 그림 30은 MICOM에 의해 제어된 PWM 파형을 나타낸다. 그림 19에서 PWM 제어 시 전력손실이 나타나는 것을 확인할 수 있는데 전력손실은 LED, 저항, IC 간의 상호작용에 의해 발생한다. 표 1에 구동전류에 따른 LED, 저항(R), IC 각각의 전력손실량을 나타내었다.

본 연구에서는 상기의 기초 연구 데이터를 토대로 내압 특성, REF 저항에 의한 정전류 변화량 등에 대한 측정과 LED, 저항, IC간의 전력손실의 변화량을 분석, 연구하여 드라이버 효율의 최적화 및 회로 안정성의 확보에 중점을 두어 LED 모듈용 드라이버 기술을 확보하였다.

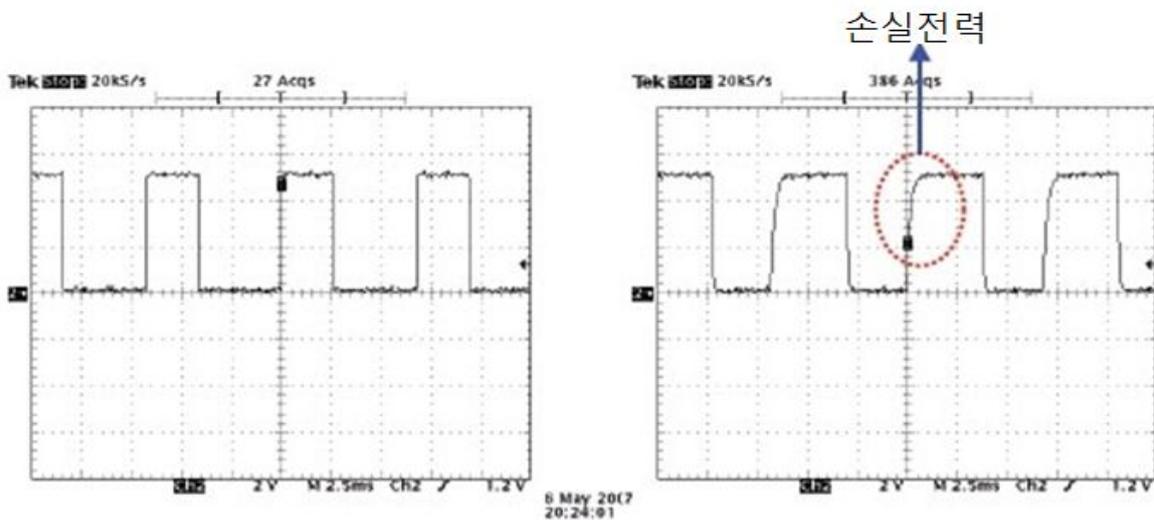


그림 30. MICOM에 의해 제어된 PWM 파형

표 1. 전류에 따른 LED, IC, 저항 간의 전력손실량

전력손실 (W)	전류 (mA)													
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
P <sub>LED</sub>	1.53	2.39	3.26	4.23	5.19	6.20	7.24	8.28	9.45	10.56	11.70	12.94	14.21	15.53
P <sub>IC</sub>	0.83	1.16	1.46	1.68	1.86	2.03	2.16	2.25	2.30	2.37	2.34	2.21	2.10	1.95
P <sub>R</sub>	0.02	0.05	0.08	0.13	0.21	0.28	0.36	0.45	0.55	0.66	0.78	0.91	1.05	1.28

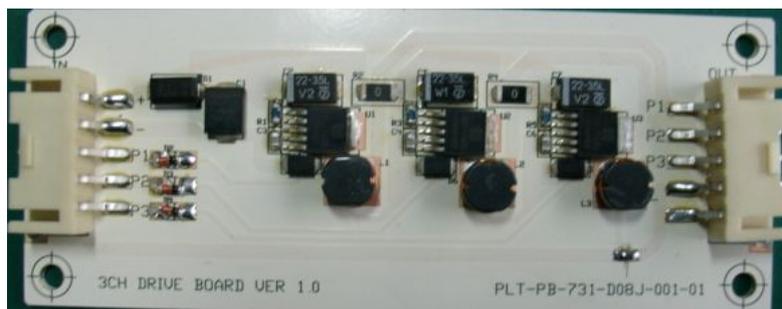


그림 31. 정전류 제어 드라이버 unit

그림 31은 본 연구에서 설계·제작된 정전류 제어 드라이버 유닛이다. 본 제품은 모든 조명등에 적용이 가능하며, 특히 식물재배용 LED 조명등에는 기존의 DC 12V 제품에 비해 드라이버 IC 부분에 있어서 80% 이상의 비용이 절감될 뿐만 아니라, 효율도 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 표2에 기존의 DC 12V 드라이버와 본 연구에서 개발한 DC 24V 드라이버의 제작비용을 비교하여 나타내었다. 기존의 DC 12V 회로와 본 연구에서 자체 개발한 IC를 적용한 DC 24V 회로의 BOM, 적용 수량, 원가를 조사·비교한 결과 드라이버 IC만 비교 시 80% 절감, 전부품을 포함한 경우 68%의 비용 절감을 확인할 수 있었다.

표 2. 기존 드라이버(DC 12V)와 개발한 드라이버(DC 24V)의 제작비용 비교

번호	부품명	DC12V				DC24V			
		종류	수량	단가(원)	소계(원)	종류	수량	단가(원)	소계(원)
1	Driver IC	MBI1804	9	670	6030	IK2804	4	300	1200
2	Micom	12F683	1	1200	1200	12F629	1	600	600
3	0.1uF	16		20	320	7		20	140
4	22uF	1		350	350	1		350	350
5	SK36	5		100	500	2		100	200
6	SS14	9		50	450	0		0	0
7	저항(2012)	19		2	38	9		2	18
8	LM7805AF	3		180	540	1		180	180
9	VARISTOR	1		80	80	0		0	0
10	Zener	0		0	0	SMC27A	1	220	220
11	Connector	1		200	200	1		200	200
		합계			9708	합계			3108

기존 제어방법의 경우 정전류 제어 시 부하 변동에 따라 펄스 크기가 달라지는 문제가 있었다. 따라서, 본 연구에서는 LED Module에 전원 인가 시 충격 서지 전압에 의한 회로 및 LED의 손상을 최소화하는 지연회로 및 프로그램을 개발하여 부하 조건에 따라 프로그램을 조정하여 시험하여 본 결과 LED의 수량이 적거나 부하가 낮은 경우(20W 이하, LED 수량 12개 이하)에서 기존 제어방법과는 달리 매우 안정적인 구동 특성을 보였다. 그림 32에 본 연구에서 개발한 프로그램에 적용된 지연회로의 타이밍 차트를 나타내었다.

드라이버 회로의 안정을 위한 반드시 고려되어야 할 요소 중 하나가 역율이다. 역율이란 교류에서 전압과 전류의 위상차이다. 교류에서 전류와 전압과의 사이에 위상차가 있으면 전력은 전류와 전압의 곱과 같지 않고 전력이 항상 작다. 따라서, 회로의 역율 개선은 고성능의 전원장치에 대한 수요의 증가와 에너지 절약 차원에서 반드시 달성해야 할 과제이며, 이런 단점을 극복하기 위해 본 연구에서도 Power Factor Correction(PFC)을 적용하여 역율을 개선시켰다.

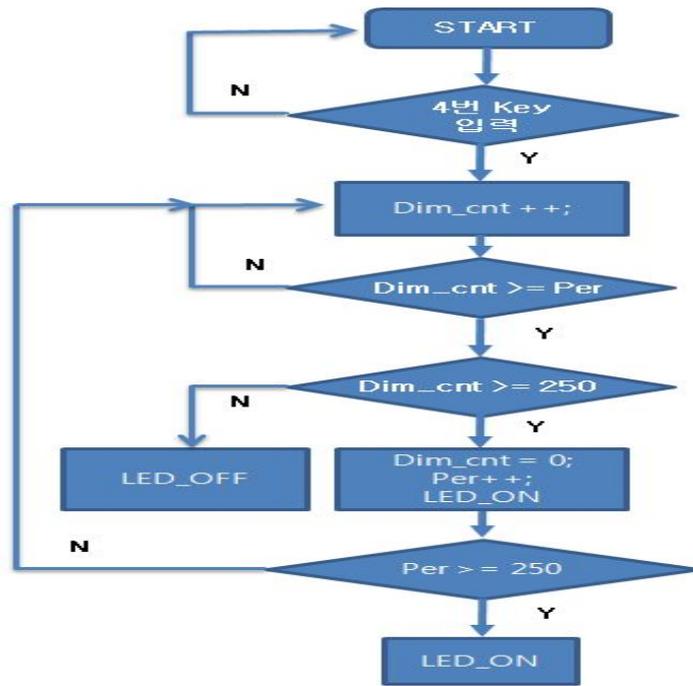


그림 32. 지연회로의 타이밍 차트

PFC란 일반적인 전기기기나 공중통신기기에 사용되는 직류전원장치의 고역률 및 고효율화를 목적으로 전력손실을 저감하여 에너지 절약을 하기 위한 말 그대로 풀이하면 “역률 보정”이고 의미적으로는 “전력효율 개선”으로 볼 수 있다. 이 기기들의 전원장치를 세분화하여 보면 AC-DC부와 DC-DC 부로 나눌 수 있는데 AC-DC부에서는 역률 문제가 무엇보다도 중요한 과제라 볼 수 있고, DC-DC부에서는 전력변환 효율의 극대화가 전력 제어 기술의 요점이라 할 수 있다. 에너지 수입의존도가 높은 우리나라에서는 꼭 필요한 기술이고, 에너지 활용적인 측면에 있어서도 고효율화하여 사용함으로써 비용의 낭비를 줄일 수 있는 방법이다.

그림 33은 PFC 적용 유무에 따른 전류-전압의 위상차 변화를 보여준다.

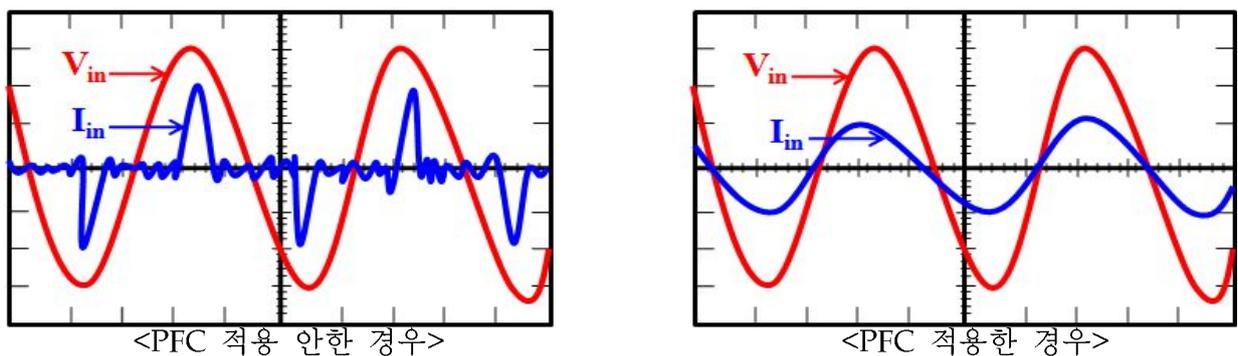


그림 33. PFC 적용 유무에 따른 전류-전압 위상차

그림 33에서와 같이 전력 효율 교정을 위해 PFC를 사용한 절전회로를 설계하고 적용함으로써 안정된 전류 공급으로 인한 전자파가 감소되었고 불필요한 전력 소비량도 감소하였다.

## 2. 식물재배용 LED 광원의 2차형 렌즈 장착 기술 개발

현재 전 세계적으로 Power LED를 양산하고 있는 메이저급 회사로는 해외에서는 필립스라이팅(루미레즈), 오스람(골든 드라곤), CREE, NICHIA 정도이며, 국내에서는 서울반도체(P4,P5,P7 series), 엘지이노텍의 XIOB 제품이 출시되어 있다.

통상적으로 양산되고 있는 LED의 형상을 보면 크게 일체형 돔 렌즈를 부착하는 타입과 부착하지 않은 두 가지 형태로 나눌 수 있으며, 돔 렌즈가 부착된 것 중에서도 플라스틱 타입과 실리콘 타입으로 나눌 수 있다.

LED 윗면에 돔 렌즈를 부착하는 이유는 부착하지 않은 LED보다 광량을 20~30% 증가시킬 수 있기 때문이다. 물론 단가는 다소 상승하지만 광 효율을 대폭 개선할 수 있기 때문에 대부분의 LED에 적용하고 있다. 현재의 LED의 방사각은 통상 90도~160도까지 분포하고 있다. 하지만 LED Chip 면적이 넓어서 방사각을 좁게 하려면 LED 면 위의 공간으로는 초점거리가 맞지 않아 별도의 큰 렌즈(통상 지름이 20mm~50mm)를 부착하여야 한다. 그러나 요구에 맞는 각종 렌즈를 비용, 기간 등의 문제로 인해 자유로이 만들기 어렵다.

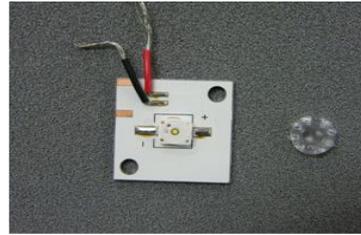
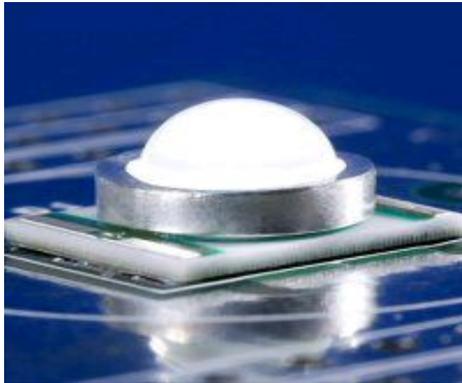
따라서 본 기관에서는 Metal PCB 면 위에 형성된 dam과 광학 2차형 광원 렌즈간의 온도에 따른 접착성, LED 면 위에서의 렌즈설치 기술, curing 조건의 최적화 등의 연구를 진행 중에 있다.

Dam/fill 공정으로 봉지한 후 2차 렌즈를 장착시켜 각각의 경우에서의 광합성능 구현 정도를 분석하였다. 기존 식물재배 LED 인공광원의 성능이 통상 10cm 거리에서 100~150  $\mu\text{mol}$  정도로 실제 농업환경에 적용 시 태양광에 비해 보광능력이 부족하다는 평가가 많았다. 따라서 이번 연구에서는 보광능력 향상을 위해 25cm 거리에서 100  $\mu\text{mol}$ 의 광합성능 구현을 목표로 2차 렌즈를 설계 후 장착하였다.

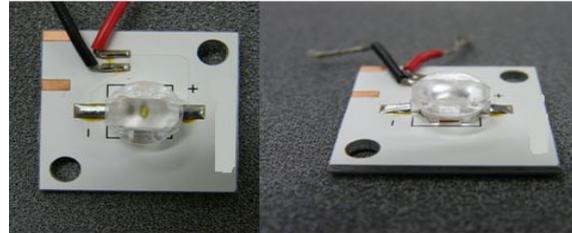
그림 34는 기존의 일체형 플라스틱 렌즈를 장착한 LED와 이번 연구에서 개발한 2차 렌즈 장착 기술을 적용한 LED 비교한 모습이다. 그림 34의 (a)는 일체형 플라스틱 렌즈를 장착한 현재 상용되는 LED 제품의 모습으로 이 경우 방사각 및 방사 면적이 한정적이라는 단점이 있다. 그림 34의 (b)는 이번 연구에서 개발한 2차 렌즈 장착 기술을 적용한 LED의 모습으로 이 경우 다양한 방사 특성을 갖는 렌즈의 자유로운 교체 장착이 가능하여 식물이 요구하는 빛의 환경에 적당한 방사 제어가 가능하다.

LED에 장착된 렌즈의 형태 및 방사각에 따른 LED의 광합성능을 분석하였다. 표 3은 기존 일체형 렌즈를 장착한 LED와 이번 연구에서 개발한 2차 렌즈 장착 기술을 적용한 LED의 광합성능 구현 값을 비교한 결과이다. 결과에서도 나타나듯이 기존 렌즈를 장착한 경우에 비해 2차 렌즈를 장착한 경우가 우수한 광합성능 구현 특성을 보였다.

2차 렌즈 장착에 따른 광 성능 향상 효과의 극대화를 위해서는 2차 렌즈뿐만 아니라 dam/fill 공정에서 봉지된 실리콘 dome을 통해 1차적으로 구현되는 광 성능 향상이 중요하다. 표 4에서 확인할 수 있듯이 2차 렌즈가 장착되지 않은 기존 상용 제품 중 Cree사의 제품이 가장 우수한 광 성능을 나타냈다. 그러나 Cree사 제품의 경우 dome이 쉽게 분리되어 많은 클레임이 발생하는 문제점이 있다.



<2차 렌즈 장착 전 LED>



<2차 렌즈 장착 후 LED>

(a)

(b)

그림 34. 일체형 플라스틱 렌즈 장착 LED(a)와 2차 렌즈 장착 LED(b)

Lumileds사 제품의 경우 봉지된 실리콘 dome의 안정성은 우수하나 비용이 고가이며 광 성능이 열악한 단점이 있다. Osram사 제품의 경우 dome 자체가 형성되지 않은 형태이다. 따라서, 본 연구에서는 Cree사 이상의 광 성능을 구현하고 저비용, dome의 안정성 확보를 목표로 실리콘 dome을 제작해 광 성능을 분석한 결과 Cree사 성능의 68.5% 정도 수준인 8.5 $\mu$ mol 정도를 나타내었다. 현재 비용 절감 효과 및 dome의 안정성 시험을 진행 중에 있으며 차후 연구를 통해 dome 각도 및 높이를 정교하게 제어하여 Cree사 이상의 광 성능을 구현하여 2차 렌즈와의 연계를 통한 광 성능 향상 효과를 극대화할 것이다. 이 기술이 실용화되면 원하는 거리에 필요로 하는 광을 저렴하고 효율적으로 제공할 수 있게 될 것이다.

표 3. 일체형 플라스틱 렌즈 장착 LED와 2차 렌즈 장착 LED의 광합성능 비교

렌즈타입	광합성능	방사각(°)																	비고		
		-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70		80	90
Cree사 -일체형 플라스틱	$\mu$ mol	1.2	1.4	1.8	3.4	4.8	5.4	6.7	8.4	10.8	12.4	10.8	8.4	6.7	5.4	4.8	3.4	1.8	1.4	1.2	기존 상용 제품
Lumileds 사 -일체형 플라스틱		1.2	1.8	2.1	2.4	2.8	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.1	3.8	3.5	3.2	2.8	2.4	2.1	1.8	1.2	
Osram사 -일체형 실리콘		2.2	3.8	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.1	6.4	6.1	5.7	5.4	5.1	4.8	4.5	4.2	3.8	2.2	
2차 렌즈	$\mu$ mol	0	5	12	25	32	44	65	83	107	116	107	83	65	44	32	25	12	5	0	기술 개발 제품

표 4는 본 연구에서 개발한 2차 렌즈의 방사각도 변화에 따른 광합성능 구현 값을 비교한 결과이다. 렌즈의 각도가 15°일 때 가장 우수한 광합성능 구현 특성을 나타냈다.

표 4. 2차 렌즈 방사각도에 따른 광합성능 변화

렌즈각도	광합성능	방사각(°)																		
		-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
15°	( $\mu\text{mol}$ )	0	5	12	25	32	44	65	83	107	116	107	83	65	44	32	25	12	5	0
25°	( $\mu\text{mol}$ )	0	2	3	5	7	14	25	42	65	82	65	42	25	14	8	5	3	2	0
45°	( $\mu\text{mol}$ )	0	1	1	2	3	6	9	18	24	28	24	18	9	6	3	2	1	1	0

따라서 이번 연구에서 개발한 2차 렌즈 장착 기술은 기존의 LED 인공광원의 문제점으로 지적되던 배광 특성을 개선하여 LED 인공광원을 이용한 보다 효율적인 식물재배를 가능하게 할 것으로 기대된다.

### 3. 식물재배의 환경적 변수 감지 및 광 특성 제어 기술 개발

본 연구에서는 향후 LED 식물재배기의 보급 및 활성화가 가시화 될 경우 최종 연도의 후반기에 자동조절 타이머에 대한 가능성 타진 연구를 수행하였다. 따라서 기존 LED 조명 제품 개발로 인해 축적된 기술을 기반으로 모든 식물의 성장 패턴에 자유롭게 적용할 수 있고, 사용자가 원하는 대로 조건 설정이 가능할 뿐만 아니라, 설정된 조건을 자동적으로 수행해 주는 기술을 개발하고자 하였다.

#### 가. 식물 재배 환경의 온도 감지 기술

식물재배 시 가장 중요한 환경적 요인 중의 하나가 온도이다. 이때 온도는 식물 성장에 영향을 미칠 뿐만 아니라 LED 인공광원의 광학 성능 구현에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 식물 재배 시 온도 변화에 따른 광학 성능 제어를 목적으로 온도 감지 기술을 개발하였다. 그림 35는 온도 감지 기술의 플로우 차트이다.

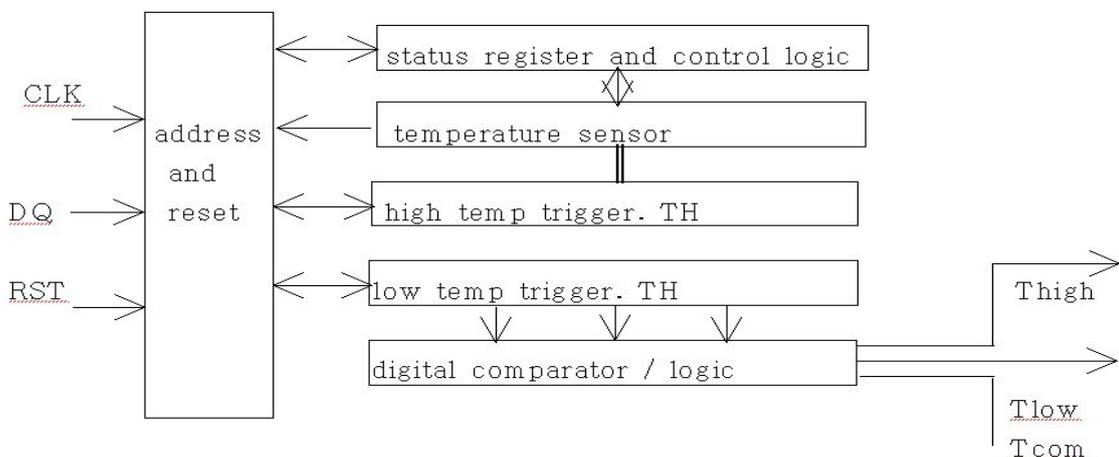


그림 35. 온도 감지 플로우 차트

온도 감지를 위해 MAXIM사의 DS1620 IC를 적용하였다. 온도범위는 -55도 ~ +125도까지 오차 ±0.5로 제어가 가능하다.

실시간으로 외기온도를 감지하여 I2C 방식으로 메인장치로 전송하도록 구성하였다.

나. 온도 조건에 따른 색 변화 장치 개발 및 신뢰성 분석

본 연구에서는 온도 감지 기술을 기반으로 실제 LED 광원의 광학 성능 제어 기술을 개발하였다. 그림 36과 37은 LED 광원의 색온도 및 색좌표 제어 기술의 플로우 차트와 온도에 따른 색온도 변화 그래프이다.

LED 모듈에서 50cm거리에 컬러센서를 설치하였으며 휘도계를 통해 색온도를 측정하였다. 이때 주변 온도는 15~35℃로 변화시켰다. KILT 대비 휘도계의 측정 결과 154K ~ 218K의 색온도 차이가 발생하였다. 그래서 1차적으로 광필터를 개선하였고 광원 시스템으로의 사용에 문제가 없게 되었다. 22℃ 이하는 휘도계나 KILT 모두 색온도 측정이 불가능하였다.

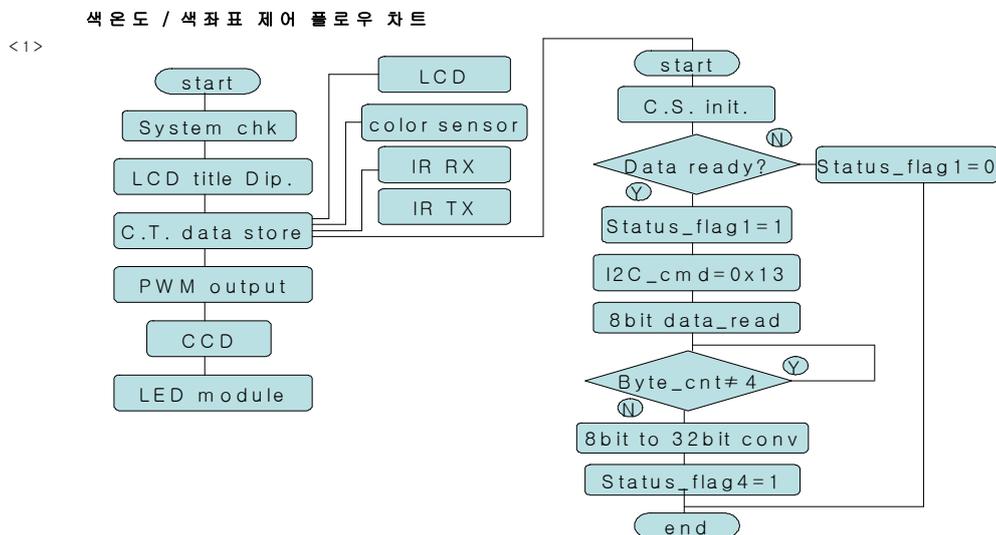


그림 36. LED 광원의 색온도/색좌표 제어 플로우 차트

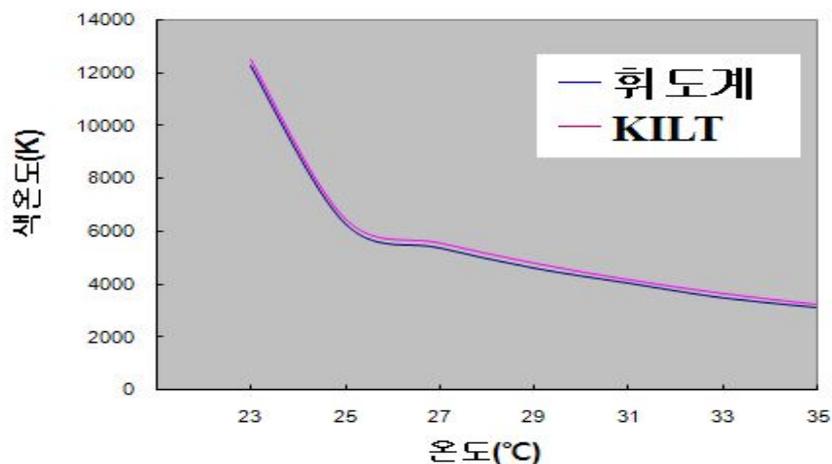


그림 37. 온도에 따른 LED 광원의 색온도 변화

그림 38은 LED 광원의 조도 제어 기술의 플로우 차트이다.

PWM을 10%씩 변화시키며 red, green, blue 별 조도를 측정하였다. LED 모듈로부터 50cm 거리에 조도계를 설치하여 조도 변화를 측정하였다. 그림 39는 PWM 변화에 따른 조도 변화 그래프이다.

PWM 변화에 따른 조도 변화 분석 결과 기준값과 실측값의 오차가 red 7%, blue 2%, green 3%로 나타났다. 특히 낮은 duty 쪽에서 편차가 크게 나타났다.

조도 제어 플로우 차트

<1>

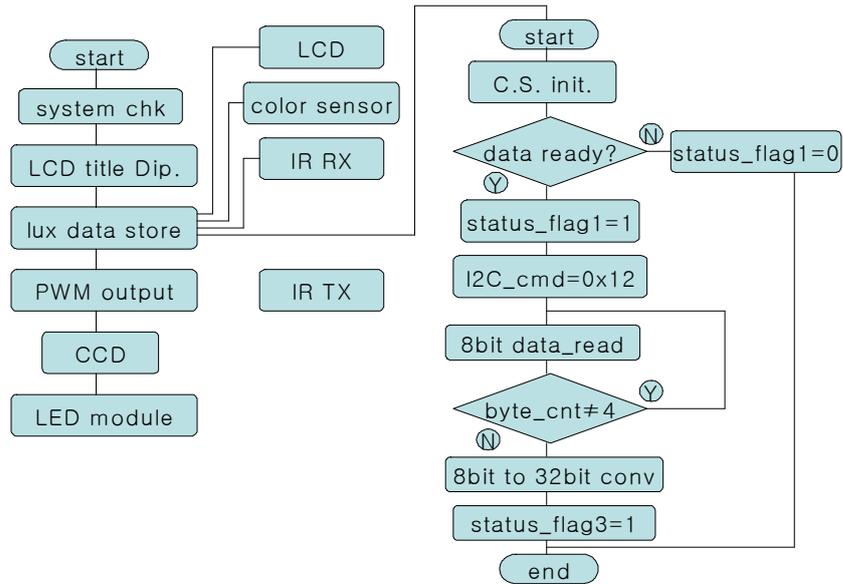
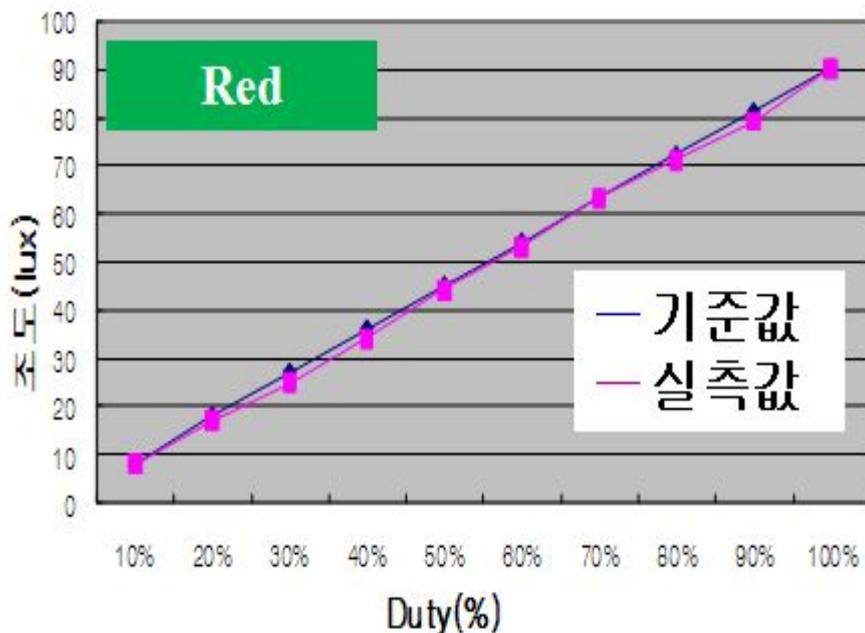
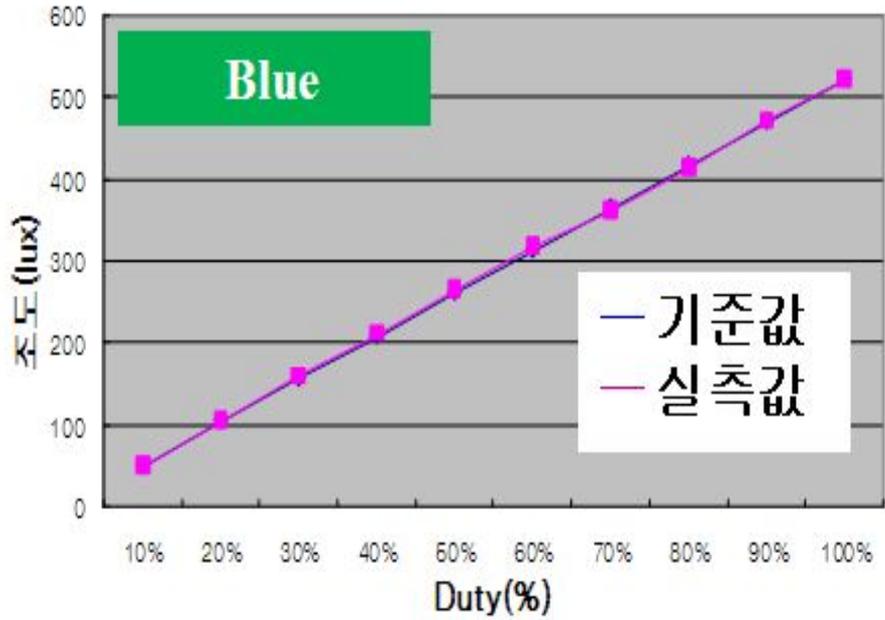


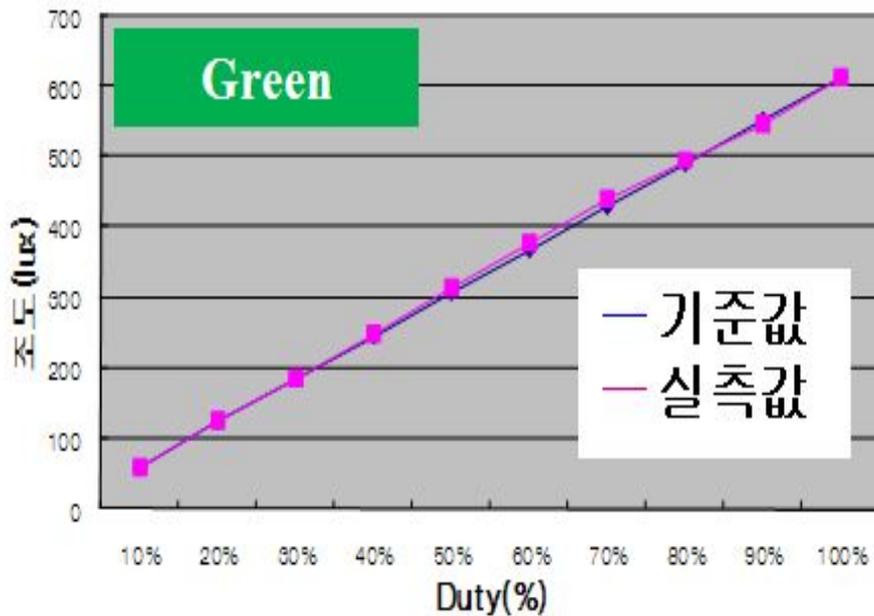
그림 38. LED 광원의 조도 제어 플로우 차트



(a)



(b)



(c)

그림 39. PWM 비에 따른 조도 변화 (a) Red (b) Blue (c) Green

#### 4. 광학 설계를 통한 광합성능 향상 기술 개발

본 연구에서는 dam/fill 공정 및 2차렌즈 장착 기술을 기반으로 48개 LED가 장착된 LED 광원의 광합성능을 분석하였다. 표 5는 연차별 개발품의 광합성능(25cm 거리)을 비교한 결과이다. 연구가 진행될수록 기초 기술을 기반으로 성능 구현을 최적화시킨 결과 최종 3차년도 개발품의 광합성능이 향상된 것을 확인할 수 있다.

표 5. 연차별 개발품의 광합성능 비교 (3.6A의 소비전류 기준)

연구년도	광합성능	방사각(°)																		
		-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1차년도	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	0	5	12	25	32	44	65	83	107	116	107	83	65	44	32	25	12	5	0
2차년도	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	0	8	21	34	45	64	97	125	151	158	151	125	97	64	45	34	21	8	0
3차년도	$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	1	10	30	40	52	71	95	114	150	215	150	114	95	71	52	40	30	10	1

5. 48개 LED가 장착된 인공광원 개발

통상적인 LED의 경우 DC 전류에 의해 구동이 된다. 그러나 농업용 전기의 경우 AC 전원이므로 본 연구에서는 SMPS(Switched-Mode Power Supply)를 통해 220V AC 전원을 연결했을 때 LED 광원 구동이 원활이 이루어지도록 하였다. 그리고 LED 광원의 설치가 용이하도록 bar 형태로 시제품을 제작하였으며 정전류 드라이버를 통해 일정량의 전류가 LED 구동을 위해 공급이 되도록 설계·제작하였다. 표 6에 개발된 LED 광원의 전기적 사양을 제시하였다.

그림 40은 48개 LED가 장착된 적광원의 회로도이다. LED 구동 시 전기적 안정성 및 구동 제어의 용이성을 위해 24개 LED가 장착된 모듈 2개를 연결하여 제작하였다.

표 6. 48개 LED가 장착된 광원의 전기적 사양

No.	항 목	기 호	내 용			단 위	비 고
			Min.	Type	Max.		
1	소비전력	Pd		77.8		W	
2	입력전압	Vin	190	220	240	V	
3	역률	Pf		50		%	
4	SMPS 출력	Vdc	DC 24V, 5A			V,A	
5	LED 특성	-	660nm SSL TYPE			-	OSRAM

각각의 모듈에는 교류전압을 직류로 변환시켜주는 정류다이오드와 정류다이오드의 맥동율을 감소시켜주는 콘덴서, 교류는 차단하고 직류만 통과시키는 인덕터, 회로와 회로사이를 연결시켜 특정 방향으로 전압을 연결하는 점프소자, 전체 회로의 전압을 조절하는 저항, 서로 독립된 회로 소자들을 내부적으로 연결하여 제 기능을 수행하도록 조절하는 IC가 장착되어 회로 구동

의 안정성 및 신뢰성을 보장해준다. 또한 디밍(Dimming) 제어 기술을 적용하였다.



크기 : 925(L) X 70(W) X 90(H)mm

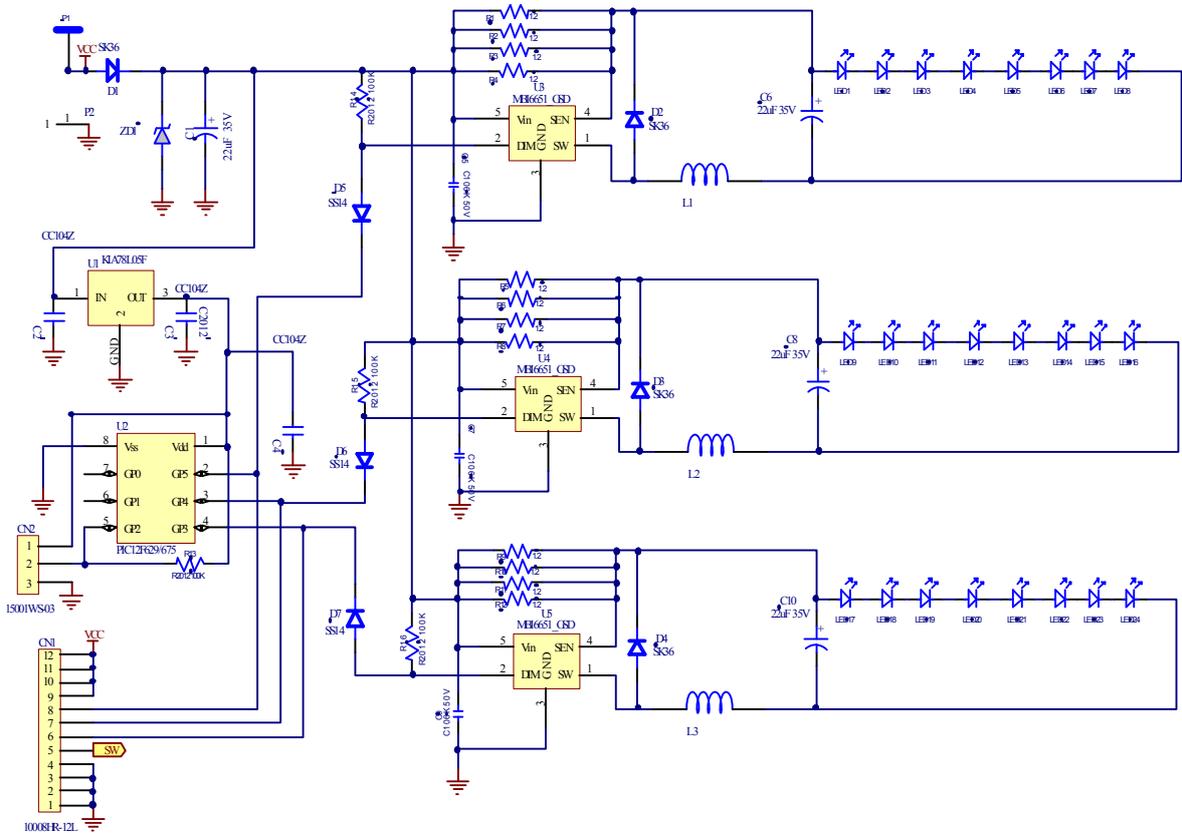


그림 40. 48개 LED가 장착된 광원 및 회로도

그림 41은 디밍을 제어할 수 있는 스위치 모습이다.

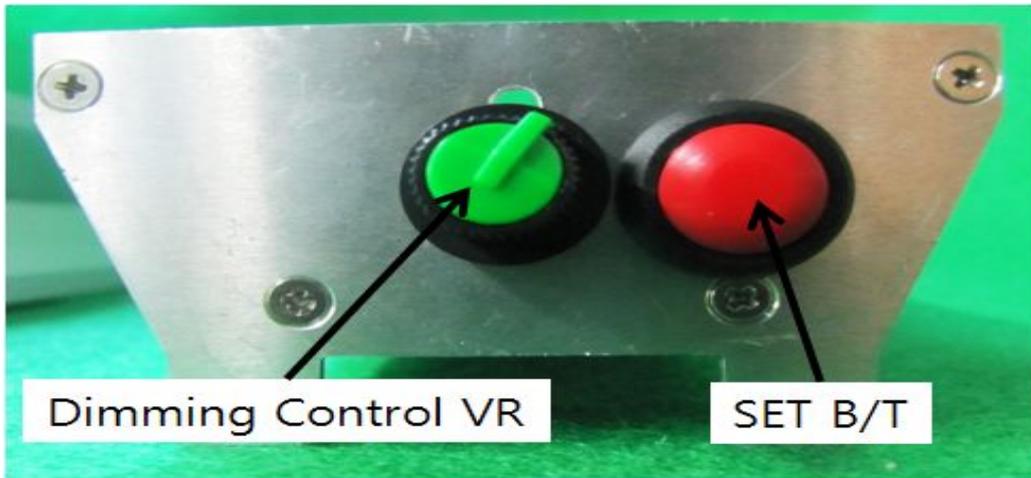


그림 41. Dimming 제어 스위치

그림 41의 스위치를 이용하여 다음과 같은 방법으로 빛을 제어한다. VR Knob를 돌려 원하는 설정 값에 위치하고 SET B/T을 1회 누르면 SETTING이 완료 되고 VR Knob를 돌려도 변화가 없다. 일부 광원만 조절을 원할 경우 조절 모드에서 VR Knob를 움직이지 않고 SET B/T을 눌러 원하는 광원 조절 모드로 진행한다.

그림 25에 나타난 LED 모듈의 광량자( $\mu\text{mol/s}$ )를 LI-250A Light Meter를 사용하여 측정하였다. 그림 42에 광량자 측정 모식도를 나타내었다.

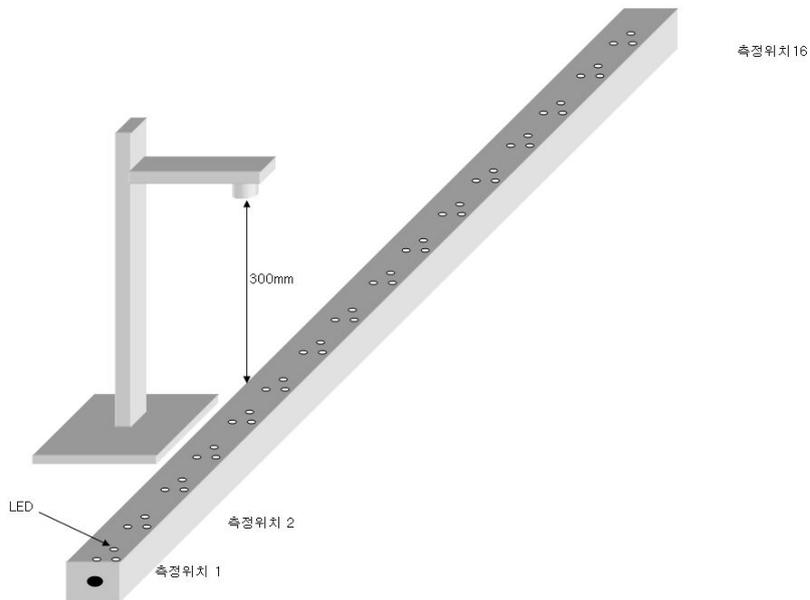


그림 42. LED 인공광원의 광량자 측정 모식도

표 7. 측정위치에 따른 광량자

측정 위치	광량자(umol/s)
1	125
2	151
3	176
4	188
5	205
6	210
7	214
8	216
9	220
10	221
11	220
12	211
13	203
14	190
15	171
16	148

표 7은 그림 42의 측정위치에 따른 광량자 측정 결과이다. 30cm 떨어진 거리에서 LED 인공 광원 중심부의 광량자가 최대 221 umol/s로 우수하게 나타났음을 알 수 있다.

그림 43은 그림 40의 제품 표면 4개소 지점의 온도 상승 그래프이다.

세부기관의 방열 설계 기술을 접목한 결과 4개 지점 모두에서 최대 온도 45℃ 이하로 안정된 열 성능을 보였다.

### 방열 표면 온도 프로파일

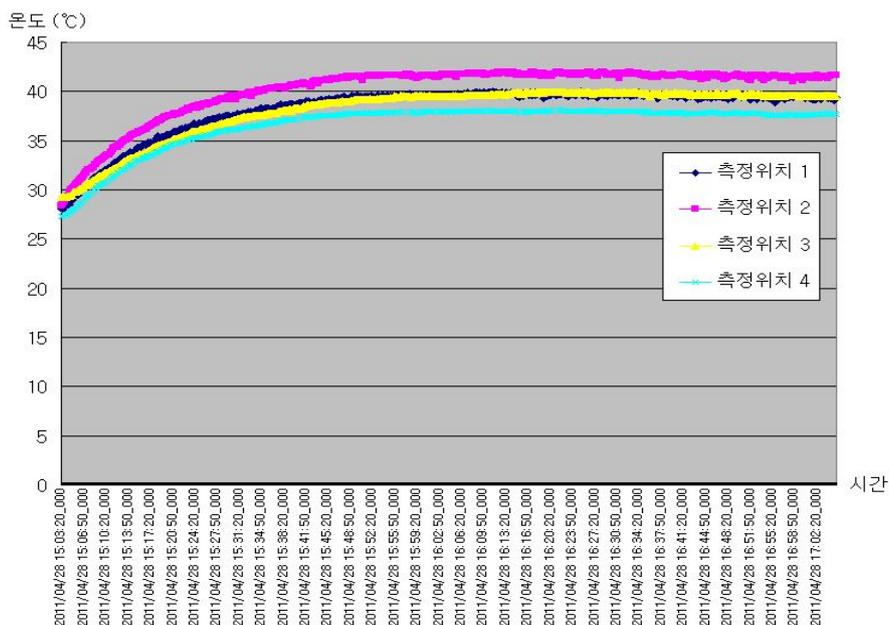


그림 43. 시간에 따른 LED 광원 제품 표면의 온도 변화

### 제 3 절 고효율 LED 식물재배기를 적용한 식물재배기술 개발 및 생육특성 연구

#### 1. 고효율 LED 식물재배기 개발

인공광원은 온실과 같은 시설원에 작물의 재배에 있어서의 보광과 전조 등의 목적으로 활용되고 있으며, 식물 공장, 우주선의 식물 재배시설 등에서는 유일한 광원으로서 그 활용 가능성에 대한 검토가 이루어지고 있다. 재배목적에 따라 백열등, 형광등, 고강도방전등(HID; High Intensity Discharge)등 다양한 인공광원이 사용되고 있다. 그 중 백열등은 전조재배시 장일효과를 내기 위한 목적으로 사용하며 이 경우에는 광주기성과 관련된 조절 기능과 관련이 있으며 원적외선 영역의 빛이 상대적으로 높아 백열등 빛을 유일한 광원으로 할 경우에는 절간신장을 촉진된다는 문제점이 있고 광원의 에너지효율이 낮고 (전기에너지의 7%정도만 빛으로 전환) 다량의 열을 발생한다는 문제가 있다. 형광등은 소규모의 식물성장상이나 종자발아상과 같은 장비의 광원으로서 에너지 효율이 20%정도이나 전구의 용량이 작아 (20 - 50W) 고휘도의 광원이 필요한 온실에서는 상대적으로 많은 개수의 전구가 필요하고 이로 인해 작물에 불필요하게 그림자가 지는 문제가 있어 잘 사용하지 않는다. 온실 보광용 HID등에는 할로겐등, 고압수은등, 고압나트륨등 등이 있으며 이 중 가장 널리 사용되는 것은 고압나트륨등(400-1,000W)은 400 - 700nm의 가시광선영역과 700-850nm의 원적외선영역의 빛을 약 25%의 에너지효율로 발생시킨다. 그러나 가장 강한 빛을 내는 영역은 589nm 부근의 황색광 영역으로 식물의 광합성에 이용되는 정도인 광 효율이 낮은 파장대이고, 전구의 수명이 짧다는 것과 열과 소음을 발생시킨다는 문제가 있다.

최근 인공광원으로서 주목을 받고 있는 발광다이오드(LED) 반사광등의 부대장치 없이 소켓에 끼우는 것으로 간단하게 설치할 수 있고, 전구의 수명이 7-10년으로 반영구적이며, 식물의 광합성과 광형태 형성과 관련이 있는 적색과 청색광의 단파장 광을 발생시킴으로써 인공 광원 사용 목적에 적합하도록 광량과 광질을 쉽게 최적화할 수 있고, 불필요한 파장영역의 빛과 열 발생 등으로 전기에너지를 낭비하지 않아 에너지효율이 높다는 (에너지 소모율은 HID 등의 20 - 30%) 장점이 있어 건전육묘 생산, 시설원예재배에 있어서 다양한 용도의 인공광원으로서 잠재력이 매우 클 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 단열 공간을 갖는 폐쇄형 육묘 시스템의 기존 광원인 형광등을 본 고효율 LED 모듈로 대체 적용하였다. 또한, 파프리카, 토마토, 수박 묘의 생리적, 형태적 특성 및 묘소질 증진 기술을 바탕으로 하여 최적 광 프로파일을 얻을 수 있는 조명 설계를 실시하여 고효율 LED 모듈을 활용한 폐쇄형 육묘 시스템의 식물 생산 모듈을 개발하였다. 식물 재배에 적합한 광원의 선택은 식물에 얼마나 효율적으로 광에너지를 이용할 수 있는가와 시스템의 운전 경비를 얼마나 낮출 수 있는가를 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 식물은 주로 가시광선의 광을 이용하나, 광질(광의 파장)에 따라 식물 생육에 미치는 효과가 다르다. 식물은 광합성을 통해 성장하나 그 외에도 광 형태형성(광에 의해 변화하는 종자발아, 화아분화, 개화, 자엽전개, 엽록소합성, 절간신장 등 식물의 질적 반응)이 중요한 광반응이다. 광형태 형성에는 phytochrome이 관여하며 약광 반응과 강광 반응이 있고, 강광 조건에서는 엽록소 합성이 청색광에서 촉진되며 적색광에서 저해됨이 알려져 있다. 광합성에는 640-690nm의 적색광의 효과가 가장 크고, 잎의 정상적인 형태 형성에는 420-470의 청색광이 필요하며, 식물의 종류와 성장단계에 따라 적색광(R)과 청색광(B)의 최적비(R/B비)가 존재한다고 알려져 있다. 본 연구에서는

고효율 LED 모듈의 파장 및 광도 조건하에서 파프리카, 토마토, 수박 묘의 광합성 및 증산 속도 등 주요 생리적 특성과 절간 신장, 초장 등 주요 형태적 특성을 평가하여 본 모듈의 식물 성장용 광원으로서의 활용 가능성을 평가하였다.

가. 광원에 따른 파장별 광도 분포

고효율 에너지 절감형 LED 인공광원의 적용을 위해 기존의 인공광원(형광등(TLD 32W/865 RS, Philips), FPL등(FPL36EX-D, 삼양전기), 식물재배용 형광등(FL40PG, 금호전기))과 고효율 LED 인공광원 모듈의 파장 분포를 분석하였다. 그림 44는 광원에 따른 파장분포 특성을 나타내는데 형광등과 FPL등의 파장분포는 유사하였고, 다른 광원보다 Green광의 비율이 높게 나타났다.

식물재배용 형광등은 다른 광원에 비해 상대적으로 Green광의 비율이 낮았으며 LED 모듈의 파장 분포 비율은 그림 46의 파장별 PPF 결과와 유사하게 나타났다.

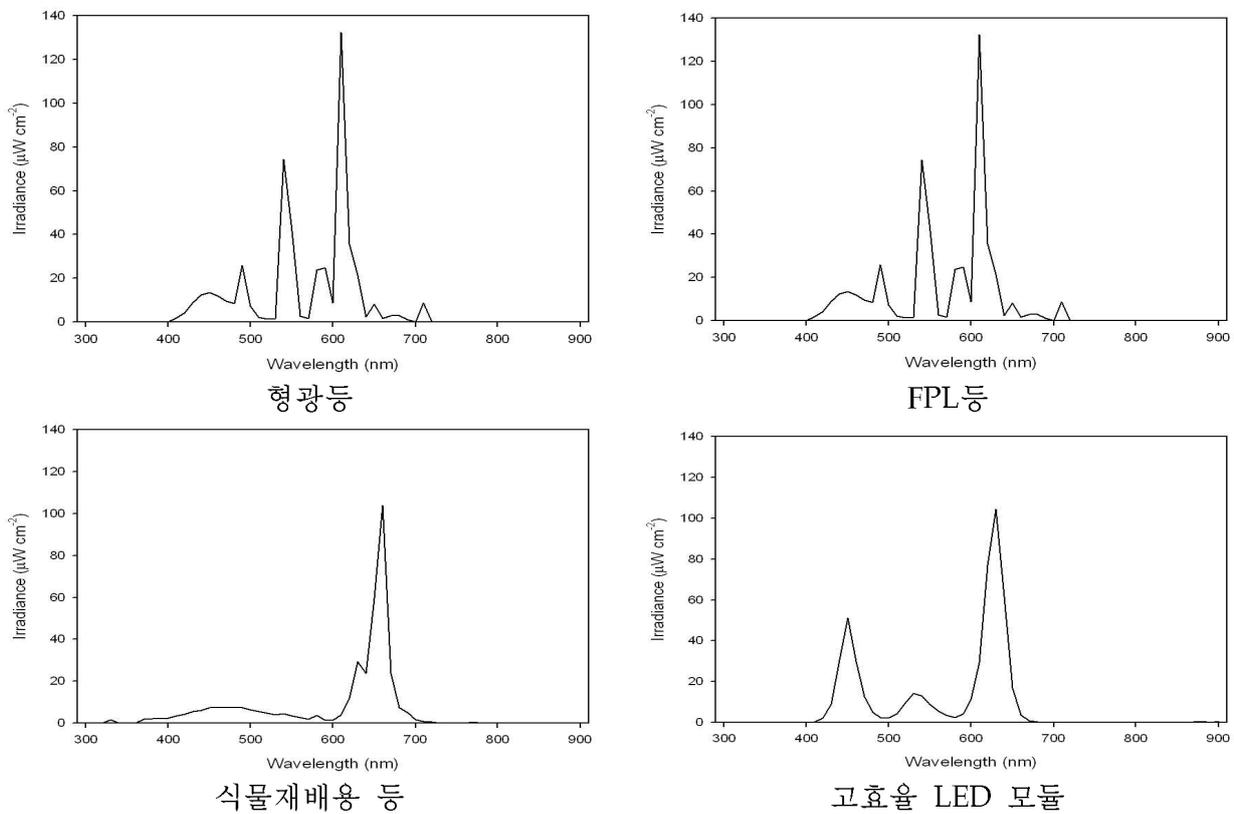


그림 44. 각 광원의 파장별 광도(PPF:  $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

나. 고효율 LED 식물재배기 제작

기존에 사용되던 육묘용 인공광원을 LED 광원 모듈로 교체 적용하였다. 그림 45는 LED 광원이 장착된 육묘시스템의 모습을 나타내었다. 각 패널당 고효율 Red, Green 및 Blue LED광원이 6개씩 장착되었고 육묘용 모듈당 6개의 패널을 설치하였다. LED 인공광원 모듈에는 Red, Green 및 Blue 광량을 각각 조절할 수 있도록 별도의 컨트롤러를 설치하였으며 방열을 통한 LED 효율 증진을 위해 패널 상부에 냉각핀 및 팬 설치하였다. 육묘에 수분 공급을 위해 저면

관수 시스템 또한 설치하였다.



(a) (b)  
그림 45. 고효율 LED 광원이 장착된 육묘시스템(a) 및 고효율 LED 모듈(b)

다. 고효율 LED 식물재배기의 파장별 광합성유효광량자속

Red, Green, Blue 세 가지 빛을 구현하는 LED 패키지들로 구성된 육묘용 LED 인공광원 모듈의 파장별 광합성유효광량자속(PPF)를 분석하였다. 이때, 각 파장의 광량은 최대치로 설정하였다. 그림 46에 제시한 LED 모듈의 파장별 PPF 결과를 보면 Red의 평균 PPF가 가장 높았고, Green이 가장 낮았는데 Red의 경우 Green 보다 PPF가 5배가량 높은 것으로 나타났다. 각 파장의 PPF의 합은 Red+Green+Blue(RGB)의 PPF와 동일하였다.

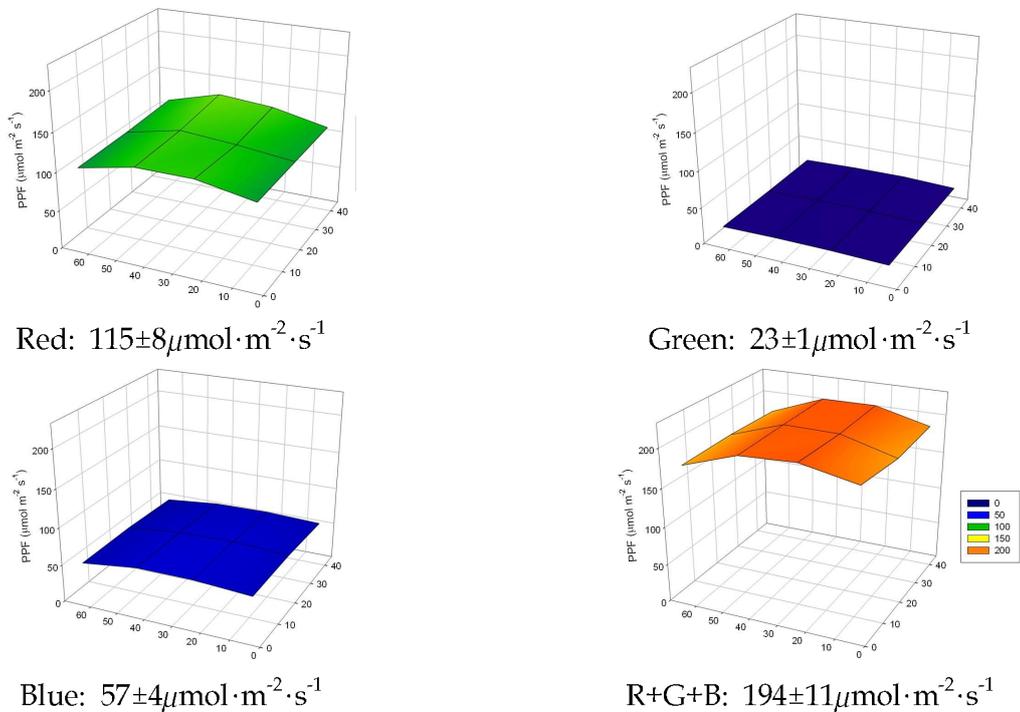


그림 46. 각 파장별 PPF(광원으로부터 40cm 이격)

## 2. 광질에 따른 엽채류의 생육 및 생리 반응 조사

광질은 광형태형성이나 광에 의해 변화하는 종자발아, 화아분화, 개화, 자엽전개, 엽록소 합성, 절간신장 등 채소의 생육(식물의 질적 반응)에 큰 영향을 미친다.

현재 보고된 연구 자료에 따르면 광합성에는 640-690nm의 적색광의 효과가 가장 크고, 잎의 정상적인 형태 형성에는 420-470nm의 청색광이 필요하다고 한다. 따라서 본 연구에서는 채소 육묘용 고효율 LED 인공광원 모듈 적용 기술 개발을 위해서 다양한 채소의 육묘 시 적합한 LED 광원 비율을 규명하는 실험을 진행하였다.

### 가. 광질이 양상추의 생육에 미치는 영향 조사

식물재료는 양상추(유레이크, (주)니카도육종농장; 센세이션, (주)코레곤)를 사용하여 LED의 광질에 따른 생육 및 생리 반응을 조사·분석하였다. 양상추 종자를 수경재배용 스펀지에 파종 후 트레이에서 14일간 육묘한 후, 수경재배용 플라스틱 베드에 정식을 실시하였다. 파종 후 7일간은 수돗물을, 이후에는 일본 원시 양액(pH 6.2, EC 1.7)을 저면관수 하였다. 생육상의 온도는 주/야 22/20°C였으며, 상대습도는 60%로 설정하였다. 실험구는 적색 LED R구, 청색 LED의 B구, 적색과 청색의 PPF비율이 각각 4:1, 9:1, 19:1인 RB4:1구, RB9:1구, RB19:1구, 적색, 녹색 및 청색을 혼합한 RGB구, 대조구인 형광등 단독의 FL구의 7개의 실험구로 설정하였다.

이때 모든 처리구의 PPF는  $175\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였으며, 명기는 16시간으로 설정하였다. 파종 후 19일에 각 처리구의 생체중 및 건물중을 측정하였다. 각 실험구 당 9개체의 식물을 공시하였으며, SAS 프로그램 (Version 9.1, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계 분석하였다.

그림 47은 파종후 17일 후의 수경용 스펀지에 파종한 양상추의 모습이다.



그림 47. 수경재배용 스펀지에 파종한 양상추

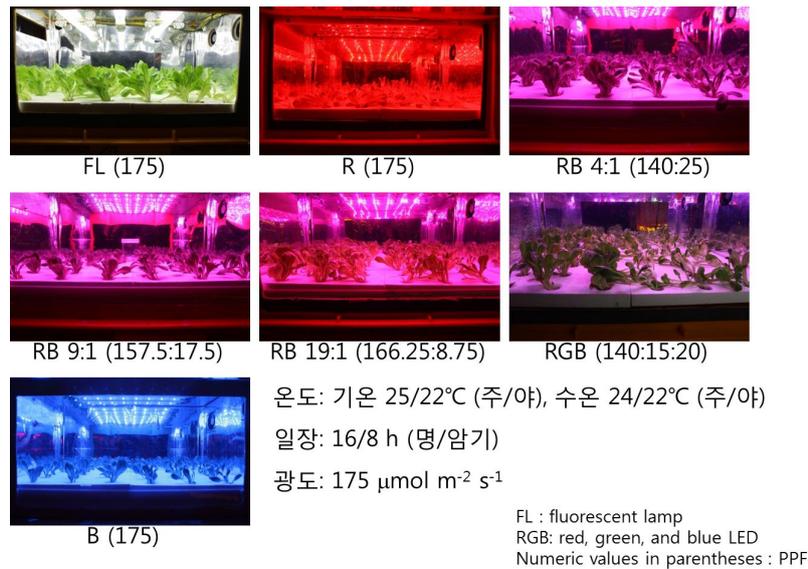


그림 48. 각 파장별 파종 후 23일 양상추

FL구와 RGB구에서 재배한 양상추의 생장은 유사하였다. 하지만 R구 및 B구의 단독 LED 처리에서는 두 품종 모두 가장 낮은 생장을 나타냈다(그림 49, 50). RGB구의 경우 대조구에 비해 생체중과 건물중의 차이가 거의 없거나 오히려 더 높은 것을 알 수 있었다. 이는 수경재배 시 LED 광원의 적용의 경우 적색 및 청색광뿐만 아니라 녹색광의 혼합이 효과적이었다고 할 수 있다.

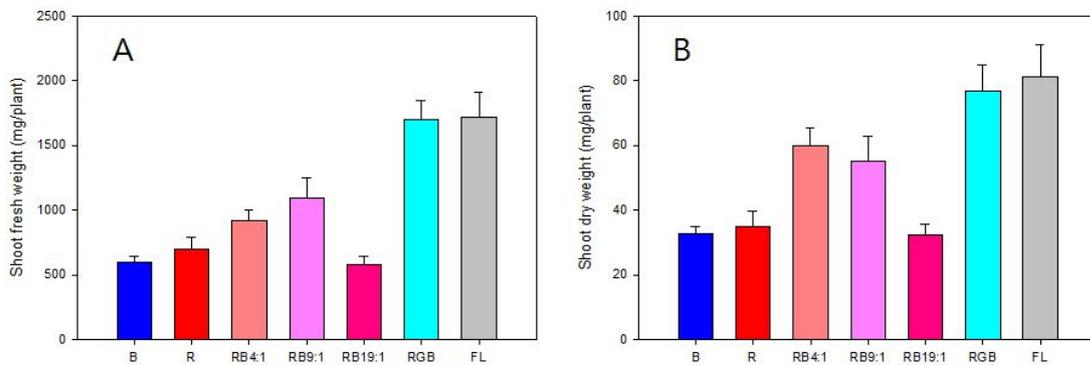


그림 49. 파종 후 19일 유레이크 양상추의 생체중(A) 및 건물중(B)

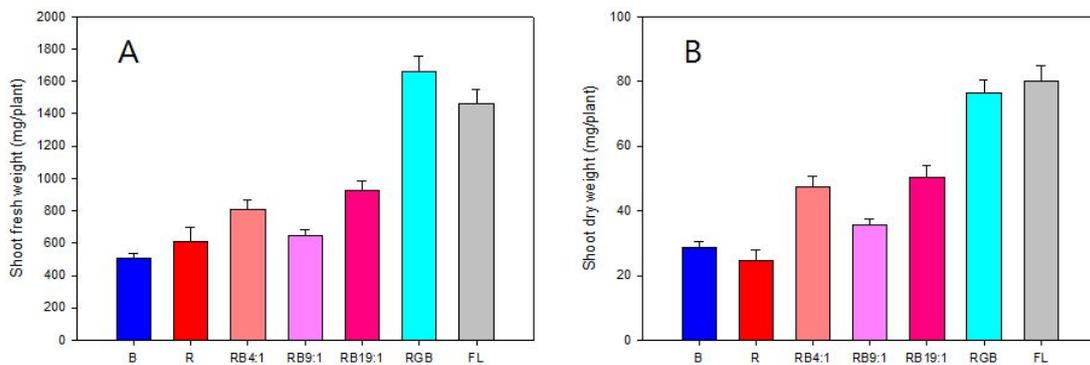


그림 50. 파종 후 19일 센세이션 양상추의 생체중(A) 및 건물중(B)

나. 광질이 상추 및 배추 묘 생육에 미치는 영향

현재 청정 엽채류 생산을 위해 수경재배가 활발하게 이루어지고 있으나, 그보다 한 단계 더 청결함을 원하는 소비자의 요구를 수용하기 위해 식물공장 적용이 검토되고, 그에 대한 연구가 진행 중이다. 식물공장을 통한 재배 시 소요되는 에너지 및 재배공간에 대한 생산효율 증대를 위해 최적의 광원 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 식물공장을 통한 엽채류 생산의 인공광원으로의 LED 적용 가능성을 알아보고자 광원 및 광질에 따른 상추 및 배추 묘의 생육 정도를 분석하였다.

식물재료는 상추(청치마 상추, 농우바이오) 및 배추(매력배추, 농우바이오)를 사용하였고 50공사각트레이에 범용상토를 채운 후 파종하였다.

파종 후 형광등을 광원으로 하는 식물재배기(FPL 등) 및 RGB 및 RB광원을 이용한 LED 식물재배기에서 명기를 16h·d<sup>-1</sup>로 설정하여 PPF가 190μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>인 조건에서 20일간 육묘하였다.

그림 51은 형광등 및 LED 식물재배기의 파장 별 광도를 나타냈다. 그림 52는 파종 후 14일이 지난 상추, 배추의 광원/광질에 따른 생육 정도를 나타낸 그림이다.

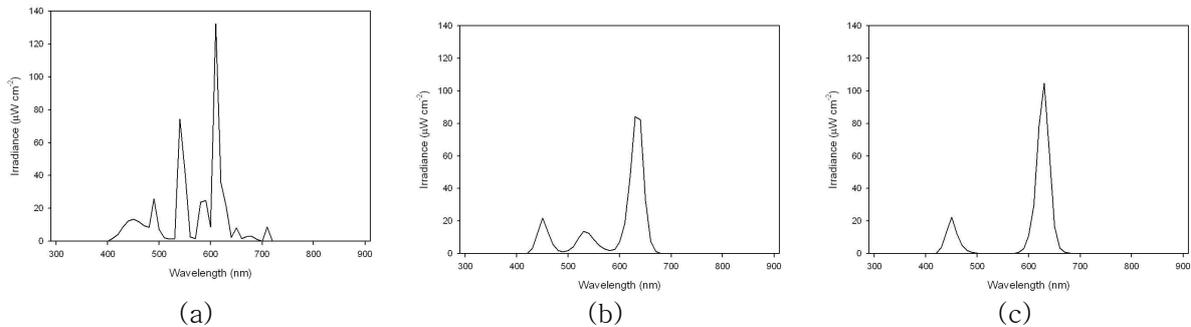


그림 51. 각 광원의 파장별 광도 FPL등(a), RGB LED(b), RB LED(c)

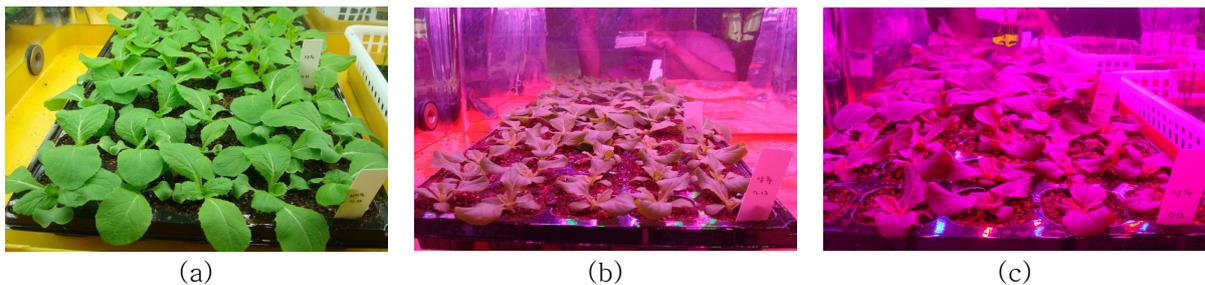


그림 52. 파종 후 14일이 지난 상추, 배추의 광원/광질에 따른 생육 정도 : FPL등(a), RGB LED(b), RB LED(c)

배추 및 상추 모두에서 광질에 따른 유의적인 생육에 차이를 보였다(표 8). Blue광 조사에 의해 배추의 지하부 생육은 촉진되었으나 상추의 경우 유의적인 차이를 보이지 않았다. Green광 조사에 의해 상추의 생육은 촉진되었으나 배추의 경우 유의적인 차이를 보이지 않았다. 위의 결과를 바탕으로 배추와 상추의 청색광 및 녹색광에 의한 반응이 다름을 확인 할 수 있었고, 이후에는 품종별, 속별, 과별 식물의 광반응을 카테고리화 하여, 광질에 의한 식물의 반응을 정의할 필요가 있다고 판단하였다.

표 8. 광질에 따른 파종 후 20일 배추 및 상추 묘의 생육

		No. of leaves	leaf area (cm <sup>2</sup> )	fresh weight(g)		dry weight(mg)		T/R ratio
				shoot	root	shoot	root	
Chinese cabbage	FPL	6.0a <sup>z</sup>	110.5a	3.76a	1.00ab	247a	59b	4.2a
	RGB	6.3a	90.1b	3.35a	1.32a	201a	60b	3.3b
	RB	6.4a	92.2b	3.46a	0.95b	233a	75a	3.1b
Lettuce	FPL	7.2a	108.1a	3.17a	0.83a	121a	35a	3.5a
	RGB	7.1a	73.7b	2.47b	0.84a	80b	34a	2.4b
	RB	7.2a	72.9b	2.41b	0.78a	79b	27a	2.9ab

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

#### 다. 광질에 따른 채소 묘의 생육 및 생리 반응 조사

광질은 광형태형성이나 광에 의해 변화하는 종자발아, 화아분화, 개화, 자엽전개, 엽록소 합성, 절간신장 등 채소의 생육(식물의 질적 반응)에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 상추(한밭 청치마, 농우바이오), 배추(매력배추, 농우바이오)를 사용하여 LED 인공광원 하에서의 생육 및 생리 반응을 조사·분석하였다. 상추 및 배추를 파종 후 20일간 LED 모듈에서 각 파장 별로 재배하여 생육 및 생리 반응을 조사하였다. 이때 LED 모듈의 PPF는 170 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다.

그림 53은 파종 후 20일 후의 상추 및 배추 묘의 파장별 생육 변화 결과이다.

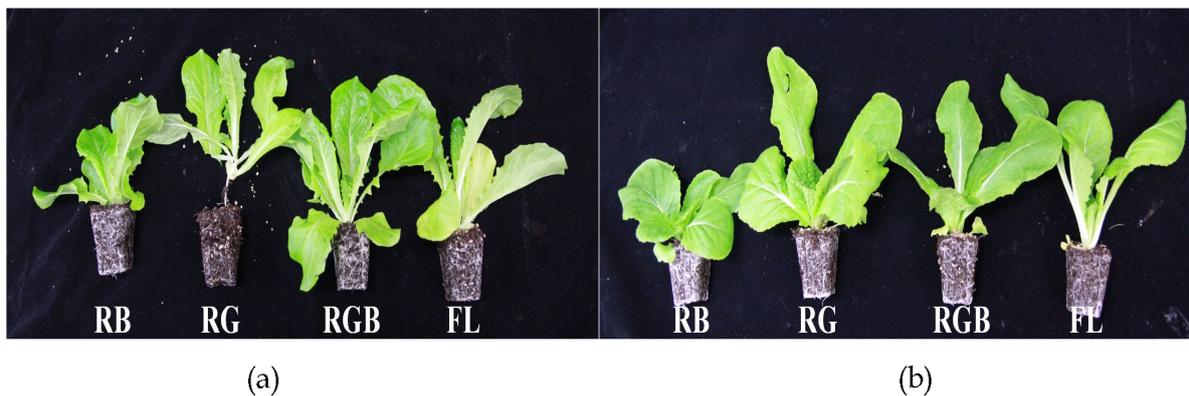


그림 53. 파종 후 20일 후의 상추(a) 및 배추(b) 묘

표 9는 파종 후 20일 후의 광질에 따른 상추와 배추 묘의 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중, 건물중, 및 TR를 비교한 결과이다.

엽면적은 FL처리구에서 두 작물 가장 높았다(표 9). 지상부의 생체중 및 건물중은 FL처리구에서 가장 높았으나 뿌리의 건물중은 두 작물 모두 청색광이 촉진 시키는 결과를 나타냈다. T/R률은 상추의 경우 RB처리구, 배추의 경우 RG처리구에서 가장 높게 나타났다.

표 9. 파종 후 20일 광질에 따른 상추, 배추 묘의 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중, 건물중, TR를

Crop	No. of leaves	leaf area (cm <sup>2</sup> )	fresh weight(g)		dry weight(mg)		T/R ratio	
			shoot	root	shoot	root		
Lettuce	FL	9.3 a <sup>z</sup>	240.53 a	7.03 a	1.13 a	311.56 a	43.67 a	7.40 b
	RGB	9.3 a	201.14 b	5.74 b	0.93 b	242.44 b	32.78 b	7.46 b
	RB	8.7 a	132.71 c	4.19 c	1.03 ab	186.78 c	32.78 b	16.47 a
	RG	7.3 b	142.69 c	3.74 c	0.26 c	159.67 c	10.33 c	5.75 b
Chinese cabbage	FL	8.0 ab	241.78 a	10.24 a	1.06 a	509.44 a	59.22 ab	8.89 a
	RGB	8.22 a	211.47 ab	7.57 b	0.98 a	394.33 b	65.00 a	7.12 ab
	RB	8.22 a	183.73 b	6.46 bc	1.17 a	379.00 b	68.00 a	6.02 b
	RG	7.44 b	179.89 b	6.06 c	0.59 b	330.33 b	38.00 b	8.44 a

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

그림 54는 파종 후 20일 광질에 따른 상추와 배추 묘의 엽록소 함량을 비교한 결과이다. 엽록소 함량은 두 작물 모두 RB 처리구에서 가장 높게 나타났음을 확인할 수 있다.

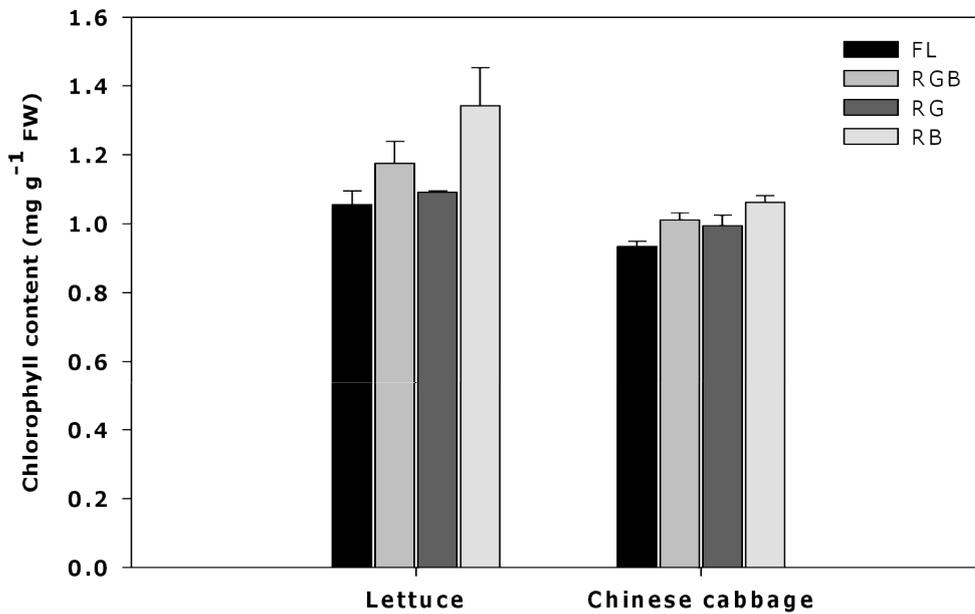


그림 54. 파종 후 20일 광질에 따른 상추와 배추 묘의 엽록소 함량

라. 광질에 따른 엽채류의 생육 및 기공 변화 조사

상추(뚝섬 적축면, 동부하이텍), 청경채(농우 청경채, 농우바이오) 배추(삼보 엇갈이, 신젠타 종묘)를 사용하여 광질에 따른 엽채류의 생육 및 생리 반응을 조사·분석하였다.

상추, 청경채, 배추묘를 파종 후 14일간 105공 포트에서 육묘 후, 9cm 포트에 정식을 실시하였다. 육묘 시 형광등 하에서 재배, 정식 후 LED 모듈에서 각 파장 별 처리를 실시하였다. 이때 LED 모듈의 PPF는  $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다.

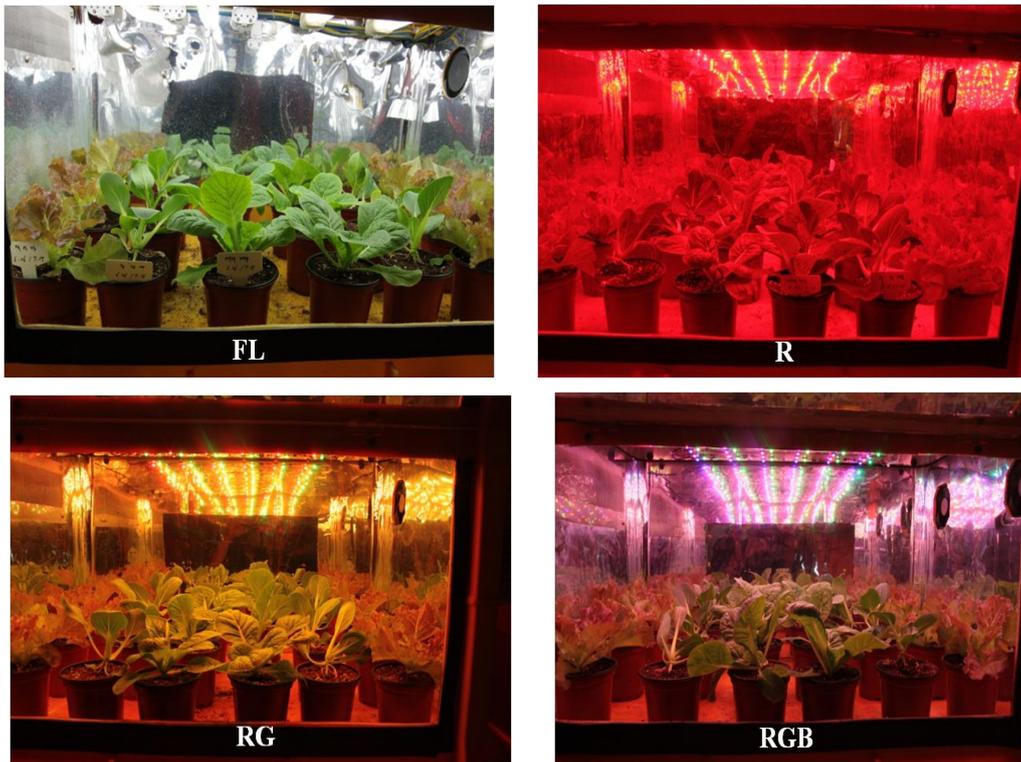


그림 55. 파종 후 14일 각 처리구 (FL: fluorescent lamp(150), R: Red(150) LED, RG: Red(125)+Green(25) LEDs, RGB: Red(125)+Green(10)+Blue(15) LEDs)

파종 후 28일에 광합성 측정기(LI-6400, LICOR)를 이용하여 광합성 속도를 측정하고 생육조사를 실시하였다. 광질에 따른 기공의 변화를 확인하기 위하여 광학현미경을 사용하여 기공의 앞, 뒷면 기공의 사진을 촬영 후 기공의 밀도 및 크기를 분석하였다.

(1) 광질에 따른 상추 묘의 생육 및 기공 변화 조사

그림 56과 57은 파종 후 28일 후의 상추 묘의 파장별 생육 변화와 생체중 및 건물중 결과이다.

그림 57에서 상추의 생체중은 FL구가 LED 처리구에 비해 지상부는 1.1배, 지하부는 1.4배 높게 나타났다. 상추의 건물중은 FL구가 LED처리구에 비해 지상부는 1.1배, 지하부는 2.0배 높게 나타났다.



그림 56. 파종 후 28일 상추

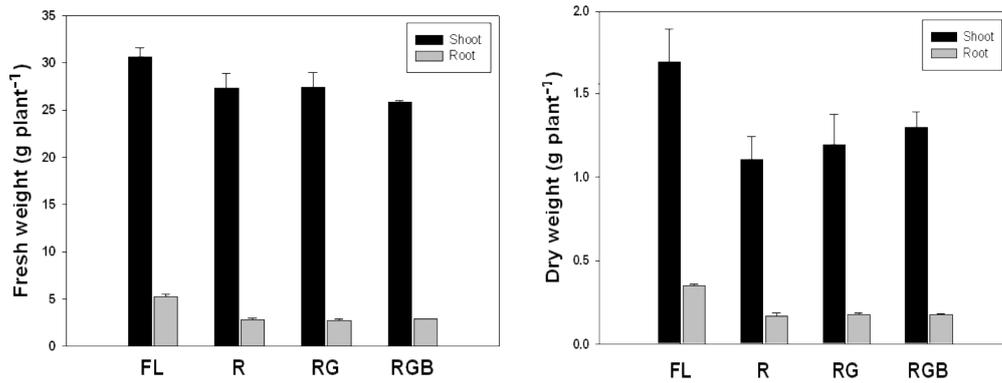


그림 57. 파종 후 28일 상추의 생체중 및 건물중

그림 58은 파종 후 28일 상추의 순 광합성 속도이다. 광질에 따른 상추의 순광합성 속도는 생육량과 같은 경향을 보였다.

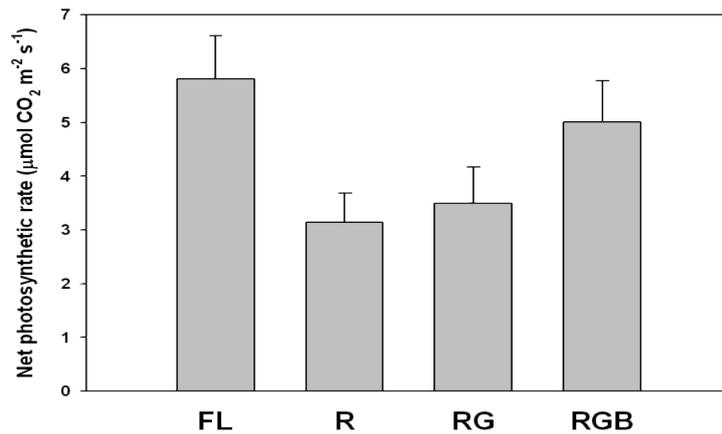


그림 58. 파종 후 28일 상추의 순 광합성 속도

그림 59와 표 10은 파종 후 28일 상추 잎 뒷면의 기공 모습과 기공 밀도 및 크기이다. 광질에 따라 상추의 기공 밀도 및 크기는 유의적으로 변화하였고, R구에서 앞의 뒷면에 기공밀도는 유의적으로 작았으며, 기공의 크기는 가장 크게 나타났다.

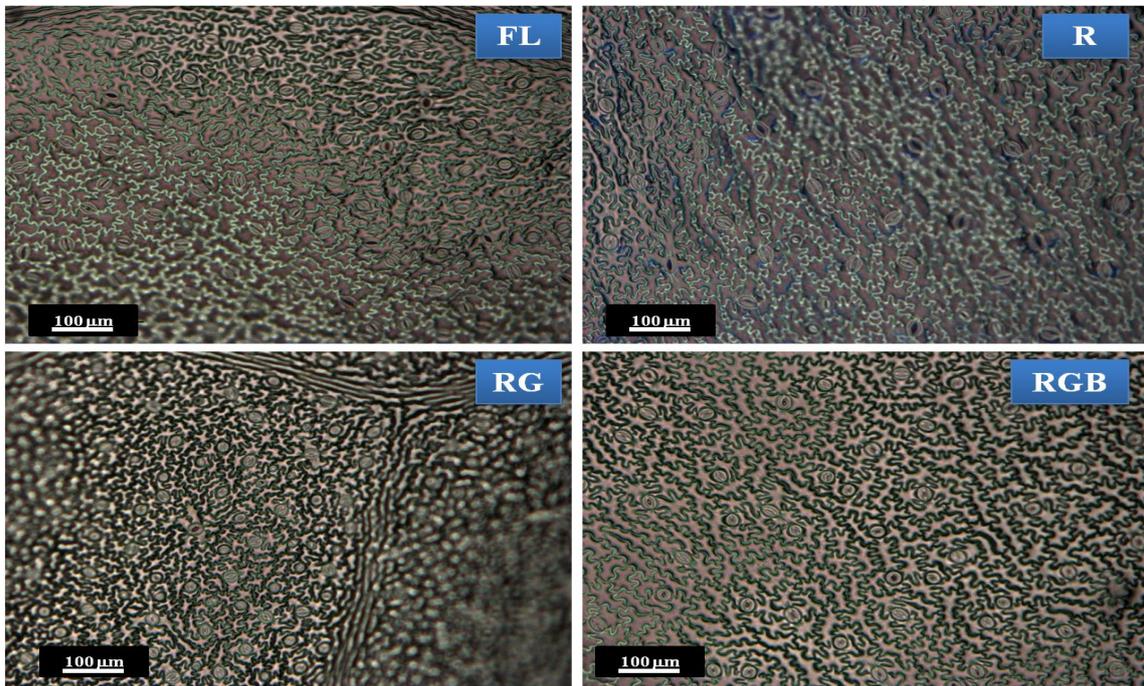


그림 59. 파종 후 28일 상추 잎 뒷면의 기공

표 10. 파종 후 28일 상추의 기공 밀도 및 크기

	Light quality	Stomatal density (mm <sup>-2</sup> )	Size (μm)	
			Width	Length
Abaxial stomata	FL	176 ab <sup>z</sup>	19.5 bc	28.3 b
	R	96 c	21.7 a	33.0 a
	RG	204 a	19.0 c	25.8 b
	RGB	124 bc	20.7 ab	31.5 a
Adaxial stomata	FL	80 ab	23.6 a	34.0 a
	R	64 b	18.1 c	28.5 b
	RG	101 a	17.3 c	27.3 b
	RGB	75 b	21.3 b	29.2 b

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

(2) 광질에 따른 청경채 묘의 생육 및 기공 변화 조사

그림 60과 61은 파종 후 28일 후의 청경채 묘의 파장별 생육 변화와 생체중 및 건물중 결과이다. 그림 2-15에서 청경채의 생체중은 FL구와 RG구가 R구와 RGB구에 비해 지상부, 지하부 모두 1.3배 높게 나타났다. 청경채의 건물중은 FL구가 가장 높았으며, RG구는 R구에 비해 1.3배, RGB구에 비해 1.6배 높게 나타났다



그림 60. 파종 후 28일 청경채

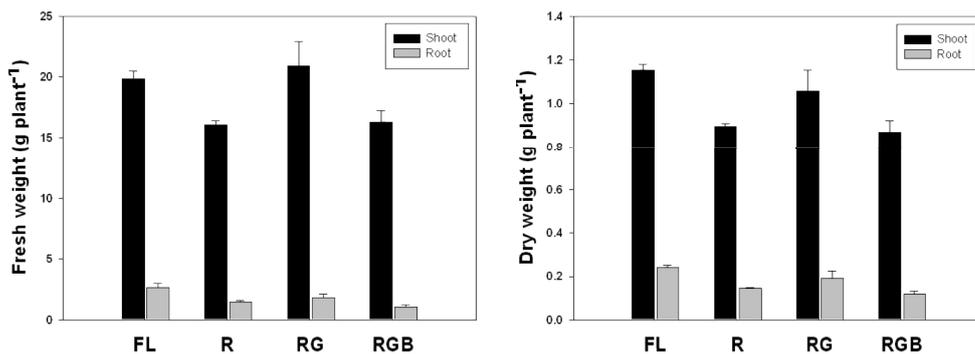


그림 61. 파종 후 28일 청경채의 생체중 및 건물중

그림 62는 파종 후 28일 청경채의 순 광합성 속도이다. 광질에 따른 상추의 순광합성 속도는 생육량과 반대의 경향을 보였다.

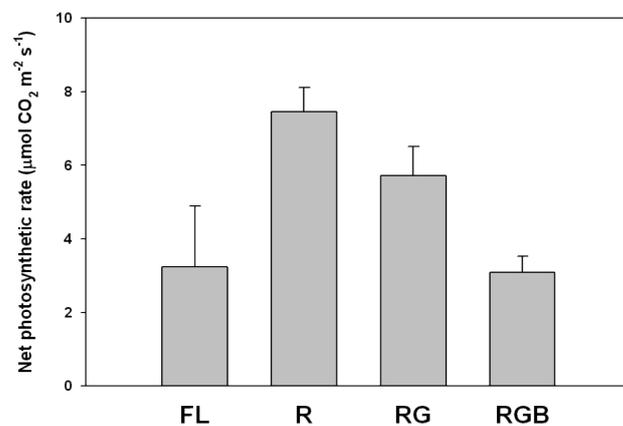


그림 62. 파종 후 28일 청경채의 순 광합성 속도

그림 63과 표 11은 파종 후 28일 청경채 잎 뒷면의 기공 모습과 기공 밀도 및 크기이다.

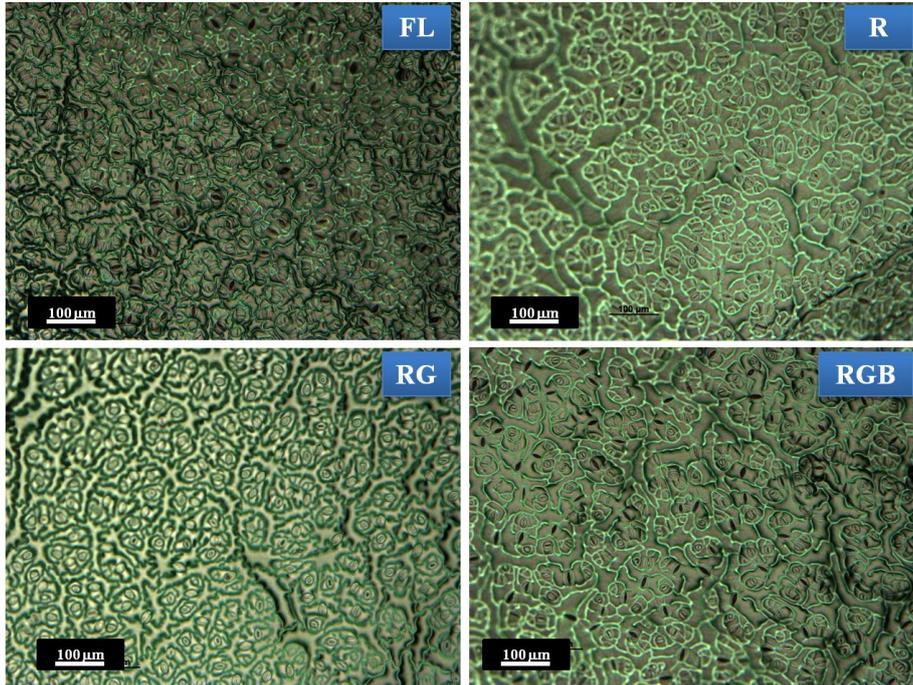


그림 63. 파종 후 28일 청경채 잎 뒷면의 기공

광질에 따라 청경채의 기공 밀도는 생육이 우수했던 FL구에서 가장 높았고, 기공의 크기 또한 가장 크게 나타났다.

표 11. 파종 후 28일 청경채의 기공 밀도 및 크기

	Light quality	Stomatal density (mm <sup>-2</sup> )	Size (μm)	
			Width	Length
Abaxial stomata	FL	496 a <sup>2</sup>	15.8 a	23.8 a
	R	357 b	13.4 b	21.6 a
	RG	293 b	14.8 ab	22.7 a
	RGB	347 b	14.8 ab	22.9 a
Adaxial stomata	FL	408 a	16.1 a	24.1 a
	R	256 ab	13.6 b	19.1 b
	RG	235 c	13.4 b	23.8 a
	RGB	331 bc	13.6 b	24.9 a

<sup>2</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

(3) 광질에 따른 배추 묘의 생육 및 기공 변화 조사

그림 64와 65는 파종 후 28일 후의 배추 묘의 파장별 생육 변화와 생체중 및 건물중 결과이다. 그림 65에서 배추의 생체중은 지상부의 경우 유의적인 차이가 없었으나, 지하부의 경우 FL구가 LED처리구에 비해 1.4배 높게 나타났다. 배추의 건물중은 FL구가 가장 높았으며, 지상부 및 지하부 모두 LED처리구에 비해 1.3배 높게 나타났다.



그림 64. 파종 후 28일 배추

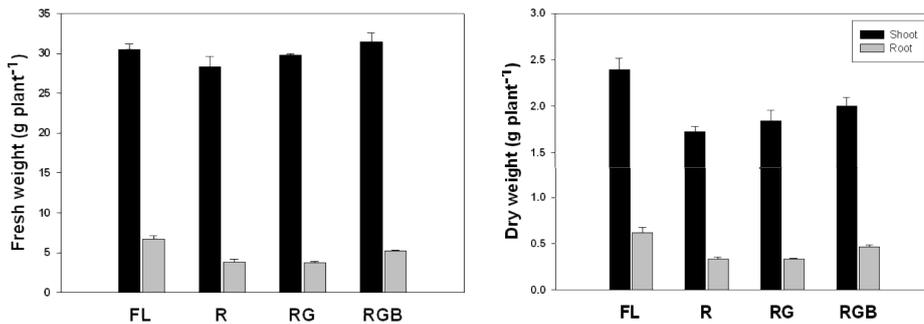


그림 65. 파종 후 28일 배추의 생체중 및 건물중

그림 66은 파종 후 28일 배추의 순 광합성 속도이다. 광질에 따른 배추의 순광합성 속도는 청경채와 유사하게 생육량과 반대의 경향을 보였다.

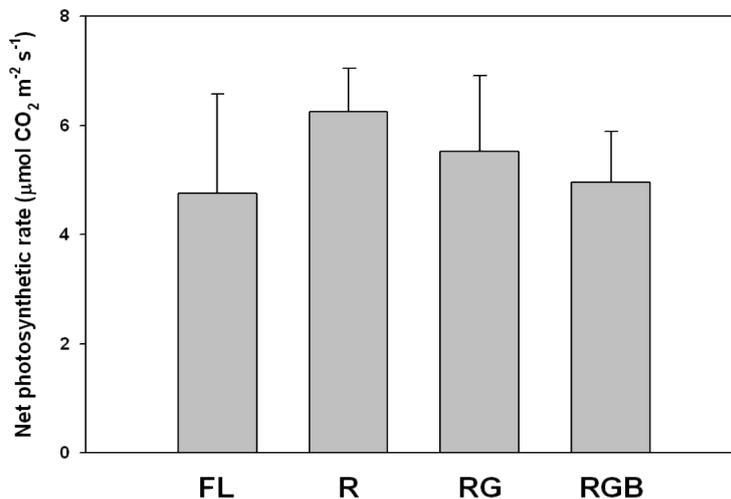


그림 66. 파종 후 28일 배추의 순 광합성 속도

그림 67과 표 12는 과중 후 28일 배추 잎 뒷면의 기공 모습과 기공 밀도 및 크기이다. 광질에 따라 배추의 기공 밀도는 생육이 우수했던 FL구와 RGB구에서 가장 높았다.

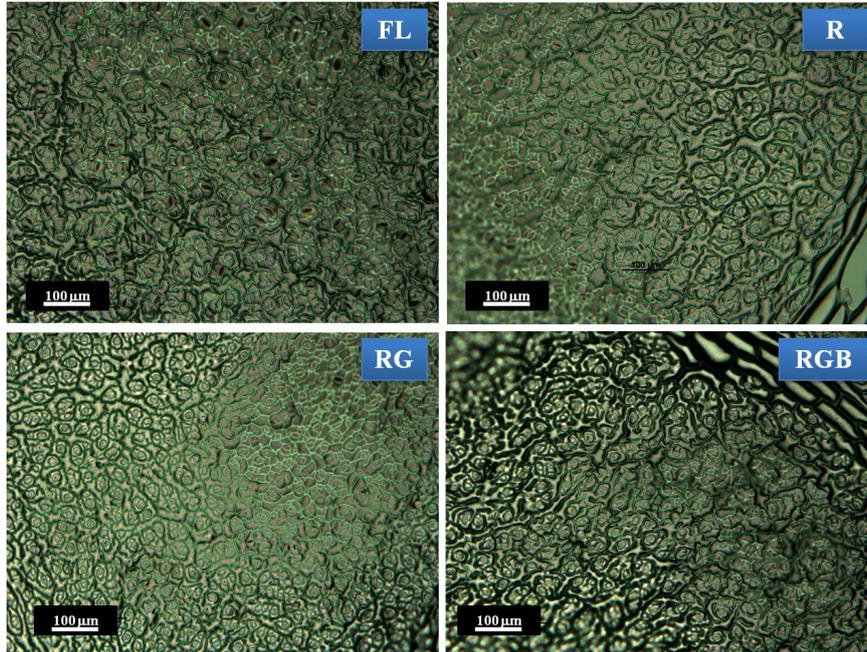


그림 67. 과중 후 28일 배추 잎 뒷면의 기공

표 12. 과중 후 28일 배추의 기공 밀도 및 크기

	Light quality	Stomatal density (mm <sup>-2</sup> )	Size (μm)	
			Width	Length
Abaxial stomata	FL	408 a <sup>z</sup>	10.5 b	14.5 b
	R	256 b	10.9 b	17.0 a
	RG	421 a	10.8 b	16.4 a
	RGB	368 a	12.5 a	17.5 a
Adaxial stomata	FL	392 a	11.0 b	15.8 b
	R	187 b	9.2 c	12.9 c
	RG	160 b	12.3 a	19.9 a
	RGB	352 a	11.8 ab	17.0 b

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

다. 광질에 따른 배추의 leaf angle 변화

식물재료는 배추(삼보 엇갈이, 신젠타 종묘)를 사용하여 광질에 따른 생육 및 광형태 변화를 조사·분석하였다. 종자를 원예용 상토를 채운 플라스틱 트레이에서 14일간 육묘한 후, 9cm 포트에 정식을 실시하였다. 파종 후 7일간은 수돗물을, 이후에는 일본 원시 양액(pH 6.2, EC 2.3)을 저면관수 하였다. 생육상의 온도는 주/야 25/20°C 였으며, 상대습도는 60%로 설정하였다. 실험구는 적색 LED 단독의 R구( $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 적색 및 녹색 LED의 RG구( $120+30\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 적색, 녹색 및 청색을 혼합한 RGB구( $120+10+20\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 대조구인 형광등 단독의 FL구( $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )의 네 개 실험구로 설정하였다.

육묘 시 형광등 하에서 재배, 정식 후 LED 모듈에서 각 파장 별 처리를 실시하였다. 이때 LED 모듈의 PPF는  $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였으며, 명기는 16시간으로 설정하였다. 파종 후 28일에 각 처리구의 엽수, 초장, 엽면적, 생체중 및 건물중을 측정하였다. 배추묘의 Leaf angle을 측정하기 위해 ImageJ 프로그램을 사용하였으며, 하위엽을 제외한 최외각 엽 사이의 각도를 측정하였다.. 각 실험구 당 9개체의 식물을 공시하였으며, SAS 프로그램 (Version 9.1, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계 분석하였다.



그림 68. 광질에 따른 파종 후 28일 배추묘의 지상부 사진

배추의 Leaf angle은 R구가 가장 낮았으며, 잎이 방향이 수직으로 향해 있음을 알 수 있었다. 적색 단독광 처리에서 배추의 잎이 직립하는 것은 광보호의 기작의 하나로써, 잎의 조사면적을 줄여 과도한 광 에너지로부터의 피해를 감소시키는 형태적인 변화라는 것을 알 수 있다(그림 69).

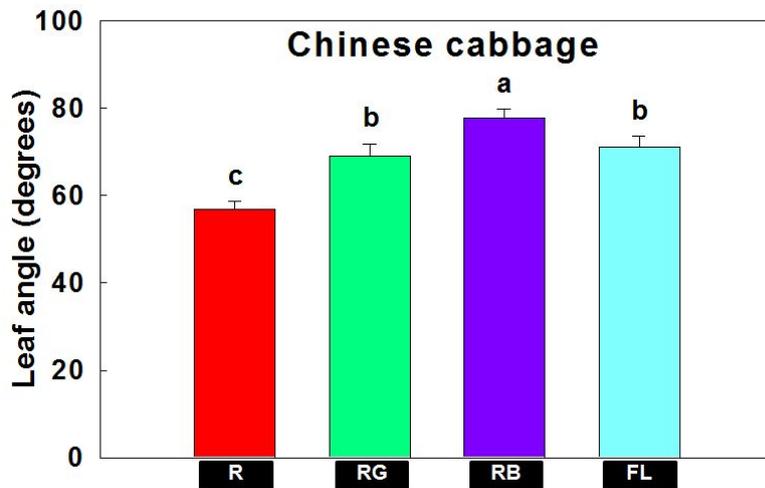


그림 69. 광질에 따른 파종 후 35일 배추의 Leaf angle

배추 RG구 및 RGB구의 지상부 및 지하부 생체중은 R구에 비해 각각 1.2배, 1.5배 높게 나타났다. 엽면적은 R구가 다른 처리구에 비해 유의적으로 낮게 나타났다(표 13).

표 13. 파종 후 35일의 광질에 따른 배추의 엽면적, 생체중, 건물중 및 T/R률

Treatment	Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		T/R ratio
		Shoot	Root	Shoot	Root	
R	399.22 b <sup>z</sup>	24.42 b	1.14 a	1287.4 c	89.6 b	14.4 b
RG	476.50 a	26.51 a	1.18 a	1613.4 a	96.9 b	16.7 a
RB	464.65 a	24.66 ab	1.34 a	1649.8 a	117.4 a	14.1 b
FL	452.03 a	25.48 ab	1.20 a	1447.3 b	86.4 b	16.8 a

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

### 3. 광질에 따른 파프리카의 생육 및 생리 반응 조사

#### 가. 광질이 파프리카 이식묘의 생육에 미치는 영향

파프리카의 종자는 타 채소에 비해 고가이므로 묘질 증진을 위해 완전 제어형 육묘 모듈의 이용 가능성을 평가하는 실험을 진행하였다. 이때, 기존의 육묘 모듈에서 사용되는 형광등보다 묘질을 개선할 수 있는 LED 광원 적용이 중요하다.

식물재료로는 파프리카 'Ferrari'를 사용하였고 암면 트레이에 파종하여 20℃ 온도에서 5일간 암상태의 챔버에서 발아시켰다.

파종 후 5일부터 20일간 FPL등 및 LED를 광원으로 사용하고 명기를 12 및 16h·d<sup>-1</sup>로 설정하여 PPF가 190 $\mu$ mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>인 조건에서 육묘하였다. 그림 70은 파종 후 13일, 17일의 광원 및 일장에 따른 파프리카 묘의 생육 변화 결과이다.

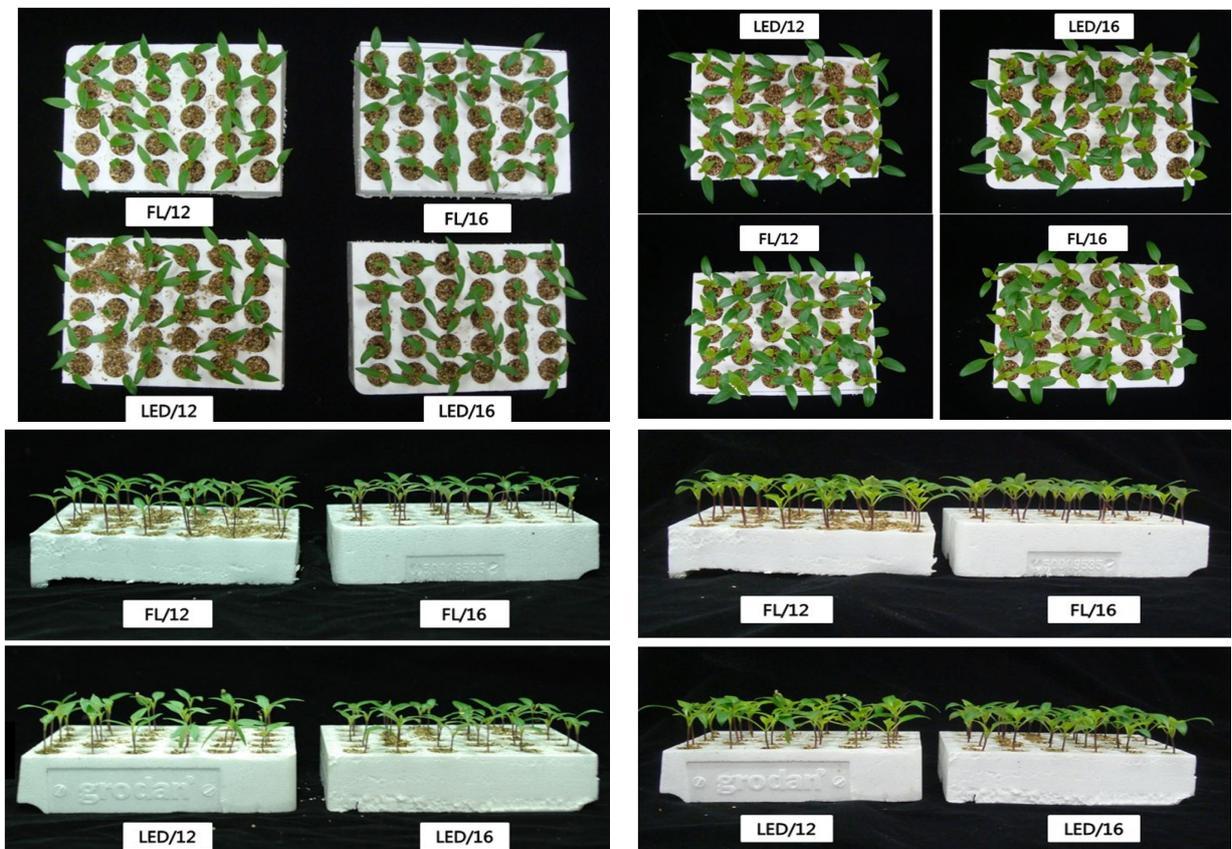


그림 70. 파종후 13일(좌) 및 17일(우)인 파프리카 묘  
(FL: FPL등, LED: 고효율 LED등, 수치: 일장)

엽수 및 T/R ratio는 광원 및 일장의 영향을 받지 않았다. LED 광원 하에서 명기 16시간으로 육묘 시 파프리카의 초장 및 하배축장이 짧았고 건물율(건물중/생체중×100)이 높았으며 seedling index가 높게 나타났다(표 14).

표 14. 광원 및 일장에 따른 파종 후 20일 파프리카 묘의 생육

Treatm ents	No. of leaves	plant height (cm)	hypocotyl height (cm)	stem diameter (mm)	fresh weight (mg)		dry weight (mg)		T/R ratio	seedling index <sup>z</sup>
					shoot	root	shoot	root		
FL/12	4a	5.1a	2.9a	1.85b	462a	103c	40b	8b	5.3a	9.4c
LED/12	3.9a	4.8ab	2.8a	1.96ab	425ab	110bc	43b	8b	5.6a	10.6c
FL/16	4a	4.4b	2.1b	1.98ab	439a	118b	51a	9a	5.6a	13.9b
LED/16	3.8a	3.6c	2.0b	2.01a	391b	129a	54a	10a	5.5a	17.6a

<sup>z</sup> Total dry weight(mg) / plant height(cm)

#### 나. 광질에 따른 토마토 묘의 생육 및 생리반응

식물재료는 토마토(슈퍼 도태량, 농우바이오)를 사용하여 광질에 따른 과채류의 생육 및 생리 반응을 조사·분석하였다. 토마토 종자를 원예용 상토를 채운 플라스틱 트레이에서 14일간 육묘한 후, 9cm 포트에 정식을 실시하였다. 파종 후 7일간은 수돗물을, 이후에는 일본 원시 양액 (pH 6.2, EC 2.3)을 저면관수 하였다. 생육상의 온도는 주/야 25/22°C였으며, 상대습도는 60%로 설정하였다. 실험구는 적색 LED 단독의 R구, 적색 및 녹색 LED의 RG구, 적색, 녹색 및 청색을 혼합한 RGB구, 대조구인 형광등 단독의 FL구의 네 개 실험구로 설정하였다.

육묘 시 형광등을 광원으로 사용하여 재배, 정식 후에는 LED를 사용하여 각 파장 별 처리를 실시하였다. 이때 LED 모듈의 PPF는  $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였으며, 명기는 16시간으로 설정하였다. 파종 후 28일 각 처리구의 엽수, 초장, 엽면적, 생체중 및 건물중을 측정하였다. 각 실험구 당 12개체의 식물을 공시하였으며, SAS 프로그램 (Version 9.1, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계 분석하였다.

그림 71은 파종 후 28일 후의 토마토 묘의 파장별 생육 변화 모습이다.



그림 71. 파종 후 28일 토마토

표 15는 파종 후 28일 광질에 따른 토마토 묘의 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중 결과이다.

파종 후 35일에 토마토 묘의 엽수는 R구가 8.9장으로 다른 처리구에 비해 1장 적었다. 초장은 FL구의 24.4cm에 비해 LED 처리구에서 길게 나타났다. 엽면적은 FL구가 가장 높았으며, R구에 비해 RGB구가 1.9배 높게 나타났다. 지상부 생체중은 FL구와 RG구가 높았으나, 지하부 생체중, 지상부 및 지하부 건물중은 FL 처리구가 가장 높았으며 LED 처리구의 경우 RGB, RG, R 순 이었다.

표 15. 파종 후 28일 광질에 따른 토마토 묘의 엽수, 엽면적, 생체중 및 건물중

	No. of leaves	Plant height (cm)	leaf area (cm <sup>2</sup> )	fresh weight(g)		dry weight(g)	
				shoot	root	shoot	root
FL	10.0 a <sup>z</sup>	24.4 d	237.3 a	17.2 a	4.95 a	1.82 a	0.37 a
R	8.9 b	32.0 b	116.6 d	13.9 b	1.76 c	0.92 c	0.12 c
RG	10.0 a	33.9 a	181.3 c	17.1 a	1.82 c	1.13 b	0.12 c
RGB	9.7 a	26.2 c	203.0 b	15.7 ab	2.50 b	1.23 b	0.17 b

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

#### 다. 광질에 따른 고추의 leaf angle 변화

식물재료는 고추(신라, (주)좋은씨앗)를 사용하여 광질에 따른 생육 및 광형태 변화를 조사·분석하였다. 종자를 원예용 상토를 채운 플라스틱 트레이에서 14일간 육묘한 후, 9cm 포트에 정식을 실시하였다. 파종 후 7일간은 수돗물을, 이후에는 일본 원시 양액(pH 6.2, EC 2.3)을 저면 관수 하였다. 생육상의 온도는 주/야 25/20°C 였으며, 상대습도는 60%로 설정하였다. 실험구는 적색 LED 단독의 R구( $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 적색 및 녹색 LED의 RG구( $120+30\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 적색, 녹색 및 청색을 혼합한 RGB구( $120+10+20\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 대조구인 형광등 단독의 FL구( $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )의 네 개 실험구로 설정하였다.

육묘 시 형광등 하에서 재배, 정식 후 LED 모듈에서 각 파장 별 처리를 실시하였다. 이때 LED 모듈의 PPF는  $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였으며, 명기는 16시간으로 설정하였다. 파종 후 28일에 각 처리구의 엽수, 초장, 엽면적, 생체중 및 건물중을 측정하였다. 배추묘의 Leaf angle을 측정하기 위해 ImageJ 프로그램을 사용하였으며, 하위엽을 제외한 최외각 엽 사이의 각도를 측정하였다.. 각 실험구 당 9개체의 식물을 공시하였으며, SAS 프로그램 (Version 9.1, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)을 이용하여 던컨의 다중검정에 의해 통계 분석하였다.



그림 72. 광질에 따른 파종 후 40일 고추묘의 지상부 사진

고추의 잎은 R구에서 가장 심하게 말리는 것을 확인 할 수 있었다. 적색 단독광 처리에서 고추의 잎이 말리는 것은 광보호의 기작의 하나로서, 잎의 조사면적을 줄여 과도한 광 에너지로부터의 피해를 감소시키는 형태적인 변화라는 것을 알 수 있다. 고추 RGB구의 지상부 및 지하부 생체중은 RG구 및 R구에 비해 각각 1.4배, 1.6배 높게 나타났다. 엽면적은 RGB구가 다른 처리구에 비해 유의적으로 높게 나타났다(표 16).

표 16. 파종 후 42일의 광질에 따른 고추의 엽면적, 생체중, 건물중 및 T/R률

Treatment	Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		T/R ratio
		Shoot	Root	Shoot	Root	
R	117.20 b <sup>z</sup>	9.28 b	5.24 a	1.20 bc	0.36 ab	3.46 b
RG	146.50 a	12.92 a	5.09 a	1.53 a	0.34 ab	4.49 a
RB	105.36 b	7.38 c	4.48 a	0.99 c	0.29 b	3.43 b
RGB	160.17 a	12.30 a	5.42 a	1.36 ab	0.43 a	3.28 b
FL	144.99 a	9.94 b	5.53 a	1.19 bc	0.38 ab	3.23 b

<sup>z</sup>Mean separation within column by Duncan's multiple range test at 5% level

#### 4. LED를 이용한 보광용 식물재배 시스템 조건 확립

신성장동력으로 떠오르는 LED는 농업부문에서도 활용도가 높아지고 있다. 빛이 부족한 시설 재배 때 빛을 대체해주는 기존의 백열전구 및 형광등에서 LED로 대체하면 전력사용을 줄이면서 생산은 늘릴 수 있다. 육묘 시스템에서 활용이 가능한 LED 보광 조건을 구명하고자 고효율 LED 식물재배기의 광질에 따른 채소묘의 광합성 효율을 평가 하였다.

##### 가. 광질이 배추, 딸기의 광합성에 미치는 영향 구명

식물재료는 배추(삼보 엇갈이, 신젠타 종묘) 및 딸기(매향)를 사용하여 광질에 따른 광합성 속도 변화를 조사·분석하였다. 4분엽이 전개된 배추와, 3분엽이 전개된 딸기의 잎을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험구는 적색 LED를 조사한 R구, 청색 LED를 조사한 B구, 적색과 청색 LED의 PPF비율이 9:1인 RB구, 적색과 청색 녹색 LED의 비율이 8:1:1인 RGB구의 총 4개의 실험구로 설정하였다. 각 처리구의 light response curve를 휴대용 광합성 측정기(LI-6400, LICOR) 및 top opened type head를 이용하여 측정하였다. light response curve는 2개체를 2 반복으로 측정하였으며, 측정치는 three parameter rectangular hyperbola I을 이용하여 회귀식으로 나타냈다.

배추의 경우 녹색광이 포함된 RGB구에 비해 RB의 광합성 속도가 모든 광 강도 조건에서 빠르게 나타났다.

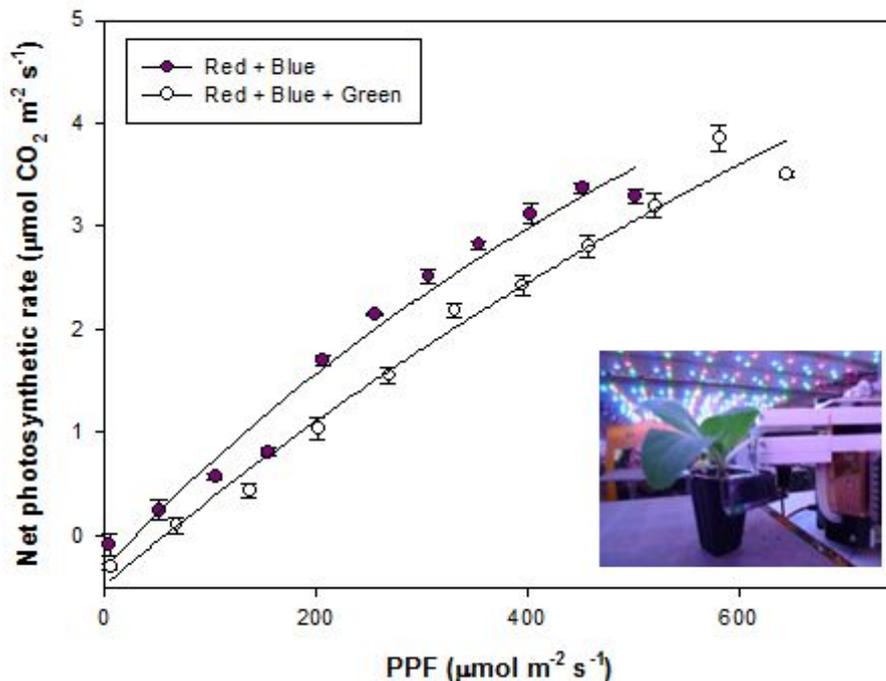


그림 73. 광질에 따른 배추의 light response curve

딸기의 경우는 적색광 단독의 R구가 가장 낮았으며, 녹색광이 포함된 RGB구가 RB구, 청색광 단독의 B구보다 광합성 속도가 빨랐다.

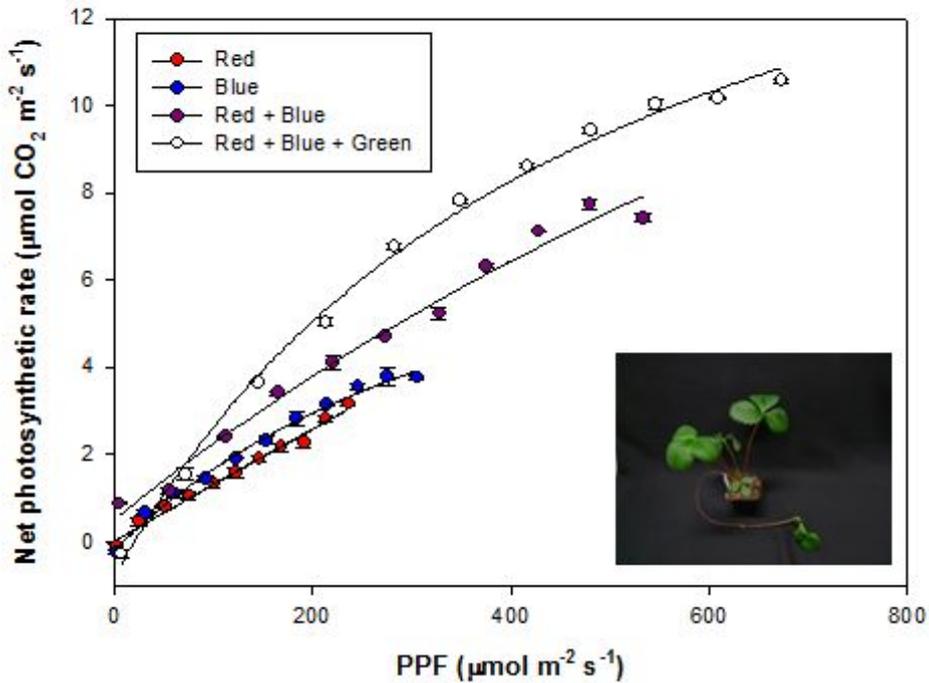


그림 74. 광질에 따른 딸기의 light response curve

#### 나. 광질이 적색 및 청색 상추의 광합성에 미치는 영향 구명

식물재료는 청치마 상추(홍농씨앗), 적치마상추(동부하이텍), 오크린상추(아시아종묘), 적오크상추(아시아종묘), 시저스그린로메인상추(아시아종묘), 시저스레드로메인상추(아시아종묘)를 사용하여 광질에 따른 상추의 광합성 속도 변화를 조사·분석하였다. 종자를 원예용 상토를 채운 플라스틱 트레이에서 14일간 육묘한 후, 9cm 포트에 정식을 실시하였다. 파종 후 7일간은 수돗물을, 이후에는 일본 원시 양액(pH 6.2, EC 1.7)을 저면관수 하였다. PPF는  $175 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 였으며, 명기는 16시간으로 설정하였다. 생육상의 온도는 주/야  $22/20^\circ\text{C}$  였으며, 상대습도는 60%로 설정되었다. 실험구는 적색 LED R구, 청색 LED의 B구, 녹색 LED G구, 적색과 청색의 PPF 비율이 각각 9:1, 5:5인 RB9:1구, RB5:5구, 대조구인 형광등 단독 FL구의 6개의 실험구로 설정하였다. 재배는 형광등 하에서 이루어졌으며, LED 모듈에서 각 파장 별 처리를 실시하였다. 파종 후 21일부터 27일까지 각 처리구의 light response curve를 휴대용 광합성 측정기(LI-6400, LICOR) 및 top closed type head를 이용하여 측정하였다. light response curve는 4개채를 2반복으로 측정하였으며, 측정치는 three parameter rectangular hyperbola I을 이용하여 회귀식으로 나타냈다.

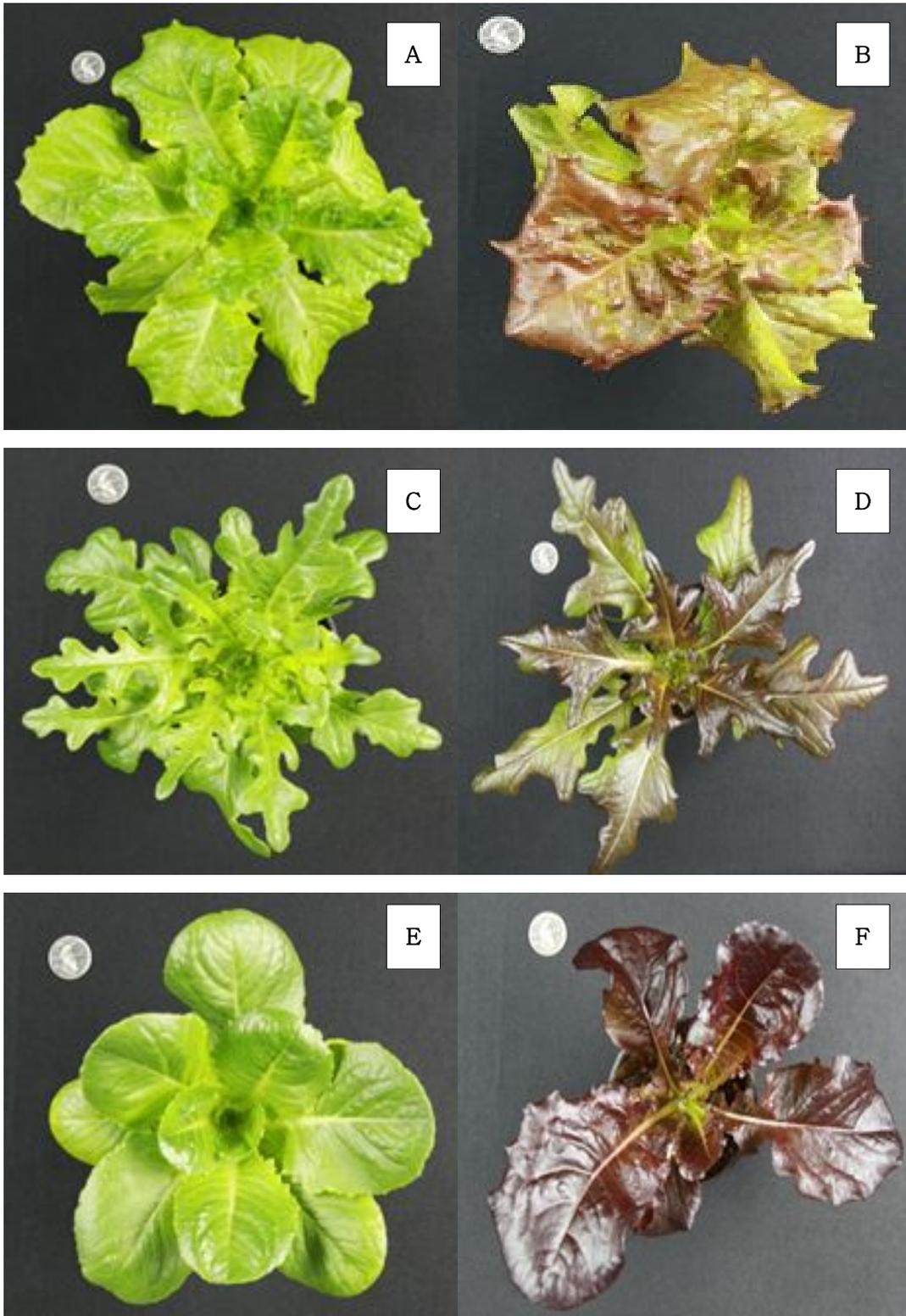
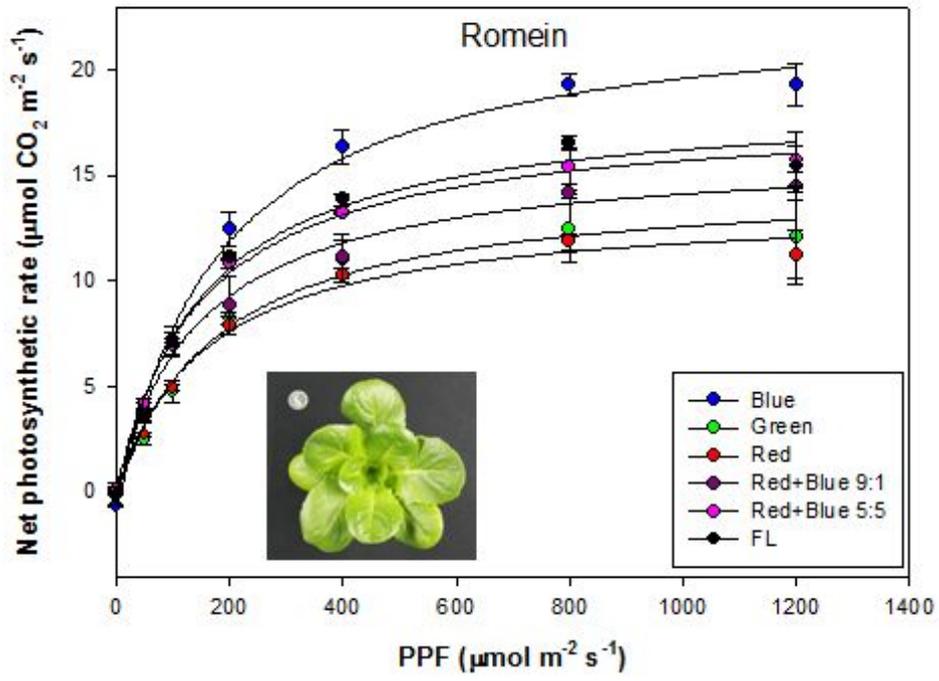
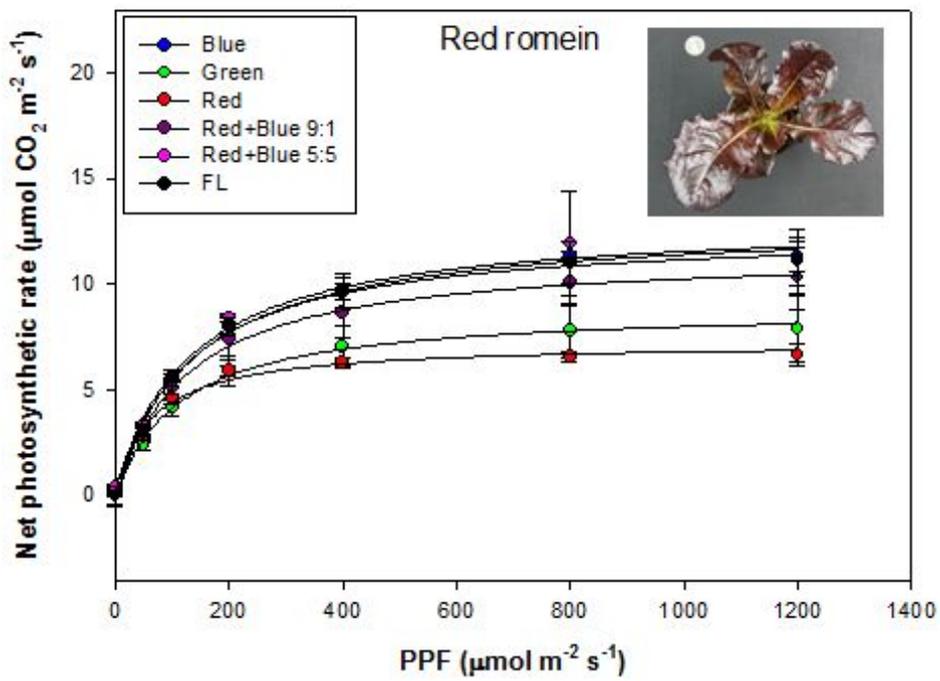


그림 75. 파종 후 28일의 상추묘의 지상부 사진(A, 청치마상추; B, 적치마상추; C, 시저스그린로메인상추; D, 시저스레드로메인상추; E, 오크린상추; F, 적오크상추)



(A)



(B)

그림 76. 치마 상추의 light response curve (A, 청치마상추; B, 적치마상추)

6종의 상추에서 청색광을 조사할 경우 광합성 속도가 가장 빨랐으며, 적색광과 녹색광을 단독 조사한 구에서 느렸다. 청치마와 오크린의 경우 녹색 단독광에서의 광합성 속도가 가장 낮았으며, 나머지 4종의 품종은 적색 단독광에서 광합성 속도가 가장 낮았다.

적색 상추는 B구, RB9:1구, RB5:5구, FL구에서 통계적인 차이를 보이지 않고 광합성 속도가  $10\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 유사하였으며, 위의 4가지 처리구의 경우가 R구 G구에 비해 2배 빨랐다. 적색 상추의 경우 실제 재배가 이루어지는 PPF인  $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  미만의 광도 하에서 R구와 G구를 제외한 나머지 처리구의 광합성 속도는 품종의 차이는 있었지만 통계적인 차이를 보이지 않고 유사하였다. 청색 상추의 경우 품종간의 차이는 존재하였으나, R구와 G구를 제외한 나머지 처리구에서도 광합성 속도의 유의적인 차이를 보였다.

## 제 4 장 목표 항목

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차 연도 (2009)	고효율 LED 모듈 구현을 위한 패키지 설계 및 성능 최적화 (제1세부)	- 열전이법 적용을 통한 LED 모듈의 성능 분석 및 설계 (multi package type)	100	- 열전이 방법 적용을 통한 LED의 정선 온도 및 열 저항 측정 및 방열 설계요소 추출
	식물재배기용 고효율 LED 모듈 및 구동회로 설계/제작 (제1협동)	- 광합성능 100 umol 이상의 LED 모듈 개발	100	- 고효율 드라이버 기술 및 LED 광원의 2 차 렌즈 장착 기술연구
	고효율 LED 식물 재배기를 적용한 식물 재배 기술 개발 및 생육 특성 연구 (제2협동)	- 고효율 LED 파장과 광도에 따른 과채류 묘의 생리적, 형태 적 특성 평가	100	- 광질에 따른 광 환경 프로파일 규명 - 과채류(파프리카)의 육묘 시 광질 에 따른 묘의 특성 평가 - 엽채류(배추 및 상추)의 육묘 시 광질에 따른 묘의 특성 평가
2차 연도 (2010)	고효율 LED 모듈 구현을 위한 패키지 설계 및 성능 최적화 (제1세부)	- LED 모듈 기구의 방열설계 개선 및 최적화 연구	100	- 전기적 연결 형태(직렬/병렬)에 따른 온도-전압의 상관관계 분석 (Temperature Sensitive Parameter) - Multi chip/package의 열적등가 회로 완성 - Super Position Method를 통한 열 저항 도출 - 고방열성 모듈 구조를 제 협동기 관에 제시
	식물재배기용 고효율 LED 모듈 및 구동회로 설계/제작 (제1협동)	- 3색 적용 LED 식물재배기 모 듈 개발 및 150 umol 이상의 광합성능 LED 모듈 개발	100	- 주관기관 측에서 제시한 고방열 성 구조를 갖는 LED 모듈 제작 - 158umol의 광합성능을 구현하는 LED 광원 개발 - DC 24V 정전류 제어 드라이버 개발 - 내압 30V 이상의 회로 설계

	고효율 LED 식물 재배기를 적용한 식물 재배 기술 개발 및 생육 특성 연구 (제2협동)	- 고효율 LED 파장에 따른 과채류 및 엽채류 묘의 생리적, 형태적 특성 평가 - 접목묘 생존률 증대를 위한 적정 광질 구명	100 100	- 과채류 및 엽채류의 광질에 따른 생육 특성 평가 및 광질에 따른 광합성 특성 평가 - 수박, 고추, 오이 등 접목 순화 시 생존률 증대 및 생육 촉진에 적합한 광질 구명
3차 연도 (2011)	고효율 LED 모듈 구현을 위한 패키지 설계 및 성능 최적화 (제1세부)	식물재배기용 LED 모듈의 광효율 분석 연구	100	- 열/광 특성 구현의 재현성 및 성능 저하 최소화 : 60℃ 이하의 케이스 온도 구현 - 고효율 LED 모듈 평가기술 개발 - Power LED의 최적 광효율 발광 구현
	식물재배기용 고효율 LED 모듈 및 구동회로 설계/제작 (제1협동)	200 $\mu\text{mol}$ 이상의 광합성능의 LED 모듈 개발	100	- LED의 배치 구조, 거리에 따른 유효 방사각도, 조명등의 방열과 광량간의 최적 조건 확립 : 25cm 거리에서 215 $\mu\text{mol}$ 구현
	고효율 LED 식물 재배기를 적용한 식물 재배 기술 개발 및 생육 특성 연구 (제2협동)	식물 생산 공정 단계별 고효율 LED의 활용 기술 개발	100	- 고효율 LED 모듈을 활용한 폐쇄형 육묘 시스템의 채소묘 생산의 적정성을 평가 - 온실 육묘 시스템에서 활용이 가능한 LED 보광 시스템 조건을 확립

## 제 5 장 연구개발 성과 및 활용계획

### 제 1 절 연구개발 성과

#### 1. 논문 발표

##### 가. 국제 저명 학술지

- Jong Hwa Choi and Moo Whan Shin, "Thermal Investigation of LED Lighting Module", *Microelectronics Reliability*, Accepted for publication, April 2011.

##### 나. 국제 학술 대회

- Lianqiao Yang, Sun Ho Jang, and Moo Whan Shin, "Development and Optimization of High Power RGB White Light Emitting Diodes", *Proc. of MICROTHERM 2009*, June 28~July 1, Lodz, Poland, 2009.

- Moo Whan Shin, "Application of High Power LEDs to Fish Gathering Lamp and Plant Growing Systems", *Proc. of China International Semiconductor Lighting Technology Forum*, July 7~8, Shanghai, China, 2009.

- Moo Whan Shin, "Thermal measurement and simulation of LED packages under an AC operation", *Proc. of International Conference on Electronic Materials 2010*, August 24, Korea, 2010.

- Moo Whan Shin, "Layout Effects of R-G-B Chips on Thermal and Optical Performance of LED Packages", *Proc. of International Conference on Electronic Materials 2010*, August 26, Korea, 2010.

- So Hyun Mun, Jong Hwa Choi and Moo Whan Shin, "Thermal Analysis of The Type of Metal Design for Light Emitting Diode", *Proc. of 17th International Workshop on Thermal investigations of ICs and Systems*, September 27, Paris, France, 2011.

- Moo Whan Shin, "Thermal Packaging of Optoelectronics", *Proc. of ICEPT2011*, August 9, Shanghai, China, 2011.

- Moo Whan Shin, "Thermal Management and Reliability of Solid State Lighting Devices",

*Proc. of CHINASSL 2011*, November 10, 2011.

다. 국내 학술 대회

- Jong Hwa Choi and Moo Whan Shin, "Thermal Optimization of Plant Growing System with LED Module as a Lighting Source", *Proc. of The Microelectronics and Packaging Society*, November 18, Korea, 2010.

- Moo Jung Kim, Seon Woo Park, So Yun Lee, Hyunseung Hwang, Changhoo Chun, "Growth of Lettuce and Chinese Cabbage Transplants as Affected by Light Quality", *Korean Journal of Horticultural Science*, May 28, Korea, 2010.

- Hyunseung Hwang and Changhoo Chun, "Growth of Chinese Cabbage, Lettuce, and Pak-choi Transplants as Affected by Light Quality of Light Emitting Diodes", *Korean Journal of Horticultural Science*, October 28, Korea, 2010.

- Hyunseung Hwang and Changhoo Chun, "Morphological Changes of Chinese Cabbage and Red Pepper Transplants as Affected by Light Quality of LED", *Korean Journal of Horticultural Science*, May 27, Korea, 2011.

- So Hyun Mun, Jong Hwa Choi and Moo Whan Shin, "Thermal Analysis of The Type of Metal Design for Light Emitting Diode", *Proc. of 1st Conference on Korea Society of Optoelectronics*, November 17, Korea, 2011.

- Jong Hwa Choi and Moo Whan Shin, "Fabrication and Thermal optimization of Plant Growing System with LED Module as a Lighting Source", *Proc. of 1st Conference on Korea Society of Optoelectronics*, November 17, Korea, 2011.

2. 특허

가. 식물재배용 발광 다이오드 조명장치 및 조명시스템

- 출원인 : 주)피엘티
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2010-0104474

나. 식물재배용 엘이디 조명등 관리시스템

- 출원인 : 주)피엘티
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2010-0011657

다. 엘이디 조명등 제어시스템

- 출원인 : 주)피엘티
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2010-0011664

라. 알에프아이디 태그를 갖는 엘이디조명등 및 그 관리 시스템

- 출원인 : 주)피엘티
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2010-0011674

마. 블랙박스 기능을 탑재한 식물재배용 엘이디 조명등 제어장치

- 출원인 : 주)피엘티
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2010-0011679

바. 방열 유닛 및 이를 이용하는 식물 배양기

- 출원인 : 신무환
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2009-0098732

사. 인공 광원 유닛 및 이를 이용하는 식물 배양기

- 출원인 : 신무환
- 출원국 : 대한민국
- 출원번호 : 10-2009-0098733

## 제 2 절 성과 활용 계획

### 1. 기술 실용화

가. 식물의 인공광 환경에 대한 연구의 기초 data

- 단색 LED의 특성, LED 간의 혼합광 및 기존광원과 LED간의 혼합광 등의 광질 특성
- 빛의 파장대에 따른 식물의 성장 및 개화의 상관관계
- 기내에서의 성장 조건 완전 제어를 통해 온실에서 불가능했던 휘발성 호르몬과 저온, 특정 파장대의 광원 처리
- 미개척 분야인 완전 제어형 식물 공장 기본 설계 자료 제공
- 신개념의 고부가 가치의 청정·고품위 작물을 적기·적소에 공급

나. 친환경적/에너지 절감형 식물재배기 및 작물 적용 기술의 보급

- 실제 현장 보급을 통해 기술력에 대한 모니터링을 실시하여 기술 적용 시장·단점 및 성과 분석, 추가사항에 대한 개선 방안 모색을 통한 상용화 노력
- 특정 작물뿐만이 아니라 적용 범위를 확대하여 시설작물 전반에 걸친 기술의 보급
- LED 광원을 사용한 식물재배의 핵심·원천 기술의 이전을 통한 첨단농업의 사업화

다. 작물별 광질 제어 기술 적용을 통한 온실 관리

- 각 작물의 LED 광원에 대한 반응성(성장성 및 영양분 효과) 조사 및 한국형 data library 구축
- Proto type 및 보급형 제어 기술 적용을 통한 농가의 채산성 개선

2. 기술 사업화

가. 참여기업의 매출 실적 및 계획

- 10여 개의 시설사업자를 통하여 본 연구에서 개발한 시제품에 대한 시판 시행 : 2009년 8천 6백만원, 2010년 2억 1천만원 상당의 매출 발생
- 시설사업자의 과도한 이익 편취로 인한 극심한 단가 경쟁, 제품 품질 저하 우려, 악의적 결재 지연 유발 등의 문제점 극복
- 제품의 단가 인하 및 효율 향상, 시설재배농가의 확장 공약을 통해 매출 향상 기대

<참여기업의 매출 실적 및 계획>

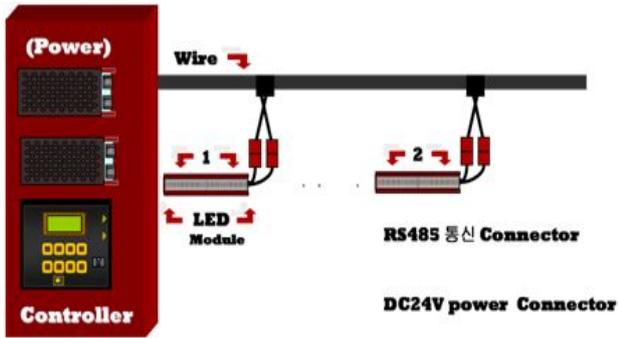
(백만원)

제품사양		연도					
SIZE(mm)	소비전력(W)	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL
460	15	0	118	430	700	1,088	2,336
	40	25	20	170	318	570	1,103
940	80	61	72	428	855	1,557	2,973
TOTAL		86	210	1,028	1,873	3,215	6,412

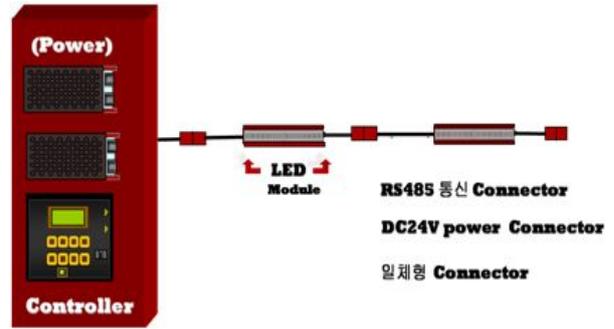
■ 매출 실적, ■ 매출 예상

나. 가격 경쟁력 확보 방안

- 통신겸용 전원 커넥터 양산 개발 완료(2011년 6월)로 인한 전문 시공업자의 불필요한 시공비 절감



<통신과 커넥터 분리형>



<통신과 커넥터 일체형>

- 중앙제어장치의 양산화로 개발 완료(2011년 4월)  
: LED 광원 시스템의 동시적인 총괄 제어 가능
- 등기구 내장형의 SMPS 개발 완료(2011년 8월)
- 상기 개발 기술의 접목을 통한 동일성능대비 제작비를 2009년(1차년도) 대비 38% 수준으로 인하 달성

<제작비 절감 현황>

(원)

15W 660nm 제품 기준	2009년	2011년
SMPS	24,000	16,000
기구물	14,000	8,000
PCB	9,600	6,000
LED	68,000	14,400
전자부품	800	100
재료비 합계	116,400	44,500
시장평가	160,000	75,000



## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 식물공장의 의의

식물공장은 농업의 발달과정에서 보면, 노지재배에서 비닐하우스를 거쳐 외부의 환경조건에서 조금은 더 자유로운 유리온실로 진화했고, 기온, 습도 등을 더욱 완벽하게 제어하기 위해 외벽을 더 보강한 결과 이로 인해 해충과 바이러스의 침입을 막을 수 있게 된 농업용 건물에 지나지 않는다.

다만 이 과정에서 식물 재배상을 다층으로 무한히 증설할 수 있는 길이 열렸으나, 그 대신 태양광의 이용이 불가능하게 되므로 해서 인공광만을 사용하는 식물 재배 방법을 채택하게 됐고, 그 덕분에 해충, 바이러스 등의 외부 침입도 막을 수 있게 되어 완전 무농약 재배를 가능하게 한 것이다.

식물공장은 근래 들어 급변하는 기후의 변화에 대처하고, 사계절 전천후 농사가 가능하고 해충의 피해, 잔류농약과 중금속, 식중독균, 수피 박테리아의 감염을 막을 수 있는 유일한 농사방법이기도 하다.

심지어는 황사, 방사능 오염, 산성비 등을 막는 대책으로도 완벽한 농업방법이고, 농경지 면적, 물과 에너지를 제일 절약하는 농사방법이기도 하다. 식물공장에서는 노지재배 보다 농경지는 10분의 1 이하, 에너지 소모량과 인력, 물의 사용량도 기존의 농사 방법보다 10분의 1 이하로 줄일 수 있다.

물론 농약은 전혀 사용하지 않아도 된다.

유기농 재배는 농업의 완벽한 형태가 아니고 안전한 식물재배방법도 아니다.

유기농 재배란 땅의 힘을 유지하면서 가능한 한 자연 그대로 형태의 농사법을 말하는데, 여기에는 잔류농약과 잔류 중금속의 제거 방법이 없고, 무엇보다 식중독균이나 기생충, 수피 박테리아의 감염을 막는 시스템이 없다는 것이 치명적인 결함이다.

농지 전체를 소독하는 방법이 없고, 만일 소독한다면 이미 유기농이 아니기 때문이다.

식물공장은 건물의 외벽을 밀폐하고 수경재배방식(또는 토경재배일지라도 흙이나 인공배지를 사용하여 이를 쉽게 살균할 수 있음)을 채택하여 여기 공급되는 물과 양액만 살균하므로써 이런 복잡한 문제를 일거에 해결할 수 있게 된다.

이러한 이유들로 해서, 앞으로 10년 쯤 후엔 우리가 먹는 식물, 특히 채소는 50% 이상이 식물공장에서 공급되리라고 본다.

우리가 수돗물을 식수로 사용하지 않고, 그보다 500배나 비싼 생수를 식수로 마시듯이 말이다.

### 제 2 절 식물공장의 초기 연구

식물공장(Vertical Farm)이라는 개념은 1999년 미국의 딕슨 디스포미어(Dickson Despommir) 교수에 의해 처음 제안된 개념으로, 미래의 인구증가에 따른 식물 생산량의 부족으로, 앞으로

는 식물을 수평상태(노지재배)의 농사에서 벗어나 수직재배(Vertical Cultivation)해야 한다는 적극 대응방안에서 시작됐다. 그는 예를 들어 30층 식물공장을 지으면 그곳에서 생산되는 식물로 50,000명 분의 식물을 생산할 수 있게 된다는 구체적 안을 제시했는데, 식물을 다층(Multi-Layer)으로 재배하고 온도, 습도 등을 제어하고 최적의 양액공급, CO2 공급 등으로 수확량을 같은 재배면적 대비 10배 정도 더 많이 늘일 수 있다고 했다.

다만 식물공장에서는 다층재배를 최대 잇점으로 하기 때문에 더는 자연광(태양광)을 사용할 수가 없게 되는데, 여기서 태양광을 대신할 인공광을 찾아내야 하는 문제가 있다  
아직까지는 식물공장이라 함은

1. 1단계 - 자연광(태양광)을 이용한 단층 재배구조의 과학적이고 자동화된 식물재배 시설
2. 2단계 - 자연광과 인공광을 혼합한 형태의 단층 재배구조의 식물 생산성 증대 시설
3. 3단계 - 인공광만을 이용한 다층 식물 재배시설

의 3가지로 구분할 수 있다. 그러나 최종의 궁극적인 대량 식물 생산시설(식물공장)은 3.항의 인공광만을 이용한 다층 식물재배구조를 말하는 것으로, 완전 밀폐된 시설에서 외부의 자연환경에 영향을 받지 않고 농약은 일체 사용하지 않으며 온도, 습도, 양액, 탄산가스 등을 최적의 상태로 자동 조절하고 인공광만을 이용하는 설비를 말한다.

그런 식물공장의 구체적 연구, 실험은 일본에서 시작되었고, 일본에는 지금 이미 50~100개 정도의 식물공장이 있으나, 아직은 대부분 자연광(태양광)과 인공광을 함께 사용하는 단층 구조의 보광재배 형태이고, 다층형 식물공장에서는 인공광으로는 주로 형광등을 사용하고 있는 실정이다.

형광등은 광변환 효율이 지금까지의 조명등 중에서는 가장 양호한 편이나 최근 들어 관심을 가지게 된 식물의 축성재배용 광원으로는 LED 광원이 더 효율적이라는 것이 많은 시험을 통해 밝혀지고 있다. 다만, LED의 가격이 아직은 너무 비싸다는 결점이 있으나 추후 기술발전 추세에 따르면 가격은 급속히 인하되어가는 반면, 광변환 효율은 더 개선되고 있으므로 곧 식물공장의 주된 광원으로 정착될 것으로 보인다.

LED광원의 또 다른 장점은 식물의 가장 광합성 효율이 높은 빛 파장대의 빛만을 모아 조사할 수도 있고 (예를 들어 660nm 파장대의 적색과 450nm 파장대의 빛을 혼합한 빛) 이런 적색과 청색 빛의 혼합 비율도 조절도 가능하며, 더 나아가 이 빛을 1초에 1,000~10,000회 까지 고속으로 ON/OFF 시킬수 있어 더 효율적이고 전기 에너지도 절약할 수 있는 길을 열게 됐다.

그러나 일본에서는 이미 7~8 년 전에 식물공장을 건립해 놓은 실정므로, 형광등 광원을 쉽게 LED로 교체하기도 어렵거니와 형광등만이 식물재배에 최적이라는 생각(형광등 신드롬)에 젖어 LED로의 기술적 전환 시기를 놓친 상태이다.

한편, 덴마크, 네덜란드와 같은 유럽지역에서는 온실 재배 기술이 매우 발달되어 있을 뿐만 아니라 모든 설치가 자동화 되어 있어 식물을 꼭 다층으로 재배해야 할 필요성이 절실하지 않아 식물공장(다층재배, 인공광 사용)쪽의 진입과 기술 발전이 늦어졌다.

그러나 최근 들어서는 일본과 유럽, 미국등이 식물공장에 깊은 관심을 가지고 있을 뿐만 아니라 적극적인 연구에 돌입해 있는 상태이다.

### 제 3 절 식물공장의 국제적 위치

식물공장은 비록 처음에는 미국의 디슨 교수에 의해 제창되었고, 약 7~8년 전부터 일본에서 첫 상업용 식물공장이 건립되기 시작했으나, 유럽은 근래에 와서 다층형 식물공장에 관심을 가지기 시작한 실정이다.

그러나 일본에서의 식물공장은 지금 이 시점에서조차 형광등을 주 광원으로 사용하고 있다.

비록 식물의 광합성에 아주 유효한 청색 LED 가 처음 일본에서 발명되었다고 하더라도 그것이 광합성 촉진용 광원으로 사용되리라고는 생각을 못했었기 때문이다.

또한 일본에서는 비록 식물공장이라고는 하더라도 태양광을 병용하는 방법의 연구 개발에 치중해 왔기 때문에 기존의 농법인 단층형 식물 재배방식이 대부분이다.

뿐만 아니라, 세계적으로 식물공장의 연구, 건립은 아직 미개척 분야로, 연구할 과제와 실질적인 사업성에 있어서도 무한한 가능성을 포함하고 있다.

식물공장에서 생산된 채소는 완전 무농약 식품으로, 더 나아가 미래에는 모든 곡물을 포함한 식물들이 생산 가능하다.

물론 식물공장에서는 과채류, 근채류 등의 특정식품, 나아가 한약재 등의 특수 목적을 가진 식물도 생산하기가 쉽다.

식물공장에서는 이뿐만 아니라 기능성 식물의 재배도 가능해서 비타민C가 대량 함유된 상추, 임산부를 위한 철분과 셀레늄이 대량 함유된 미나리, 또는 특정 영양소가 함유되거나, 감기 예방을 위한 상추 등의 생산도 가능하고, 이에 대한 많은 연구도 진행되고 있다.

양액에서부터 기온, 습도, 광원의 밝기와 질을 조절함에 따라 식물은 함유성분이 달라지기 때문이다.

LED의 제조 기술은 반도체나 태양광 발전설비의 기본 셀(Cell)을 만드는 공정과 흡사해서, 한국, 일본, 대만이 앞서 있다.

한국은 세계적 반도체 강국이므로 당연히 LED 제조 기술도 언젠가는 세계를 제패할 것이며, 이를 이용한 기술, 특히 인공광을 이용한 식물의 축성재배 방면에서의 기술도 동반 성장할 것으로 기대되는 만큼, 우리가 시의적절한 타이밍과 좀 더 적극적인 연구를 한다면, 식물공장에 관한 지식과 데이터를 축적할 수 있고, 세계적으로도 독보적인 위치를 차지할 수 있으리라고 본다.

영국의 수도 런던은 북위 51도 선상에 위치해 있기 때문에 겨울철이면 태양의 양각이 15.5도 밖에 안되고 낮이 짧기 때문에 채소를 남아프리카 공화국에서 공수해 온다.

지구의 북반부에서 겨울이 되면 남반부쪽인 남아공은 여름철이고, 채소의 수확이 왕성해 가격이 싸기 때문이다. 다만 남아공에서 채소 1kg을 런던까지 공수해 오기 위해서는 항공기 연료를 소모하는데 드는 탄산가스 발생량이 430g이 된다.

그러나 앞으로는 이렇듯 비행기 연료의 소모에 따른 탄산가스 발생이 규제를 받게 되므로 채소 등의 장거리 운송이 불가능해지고 대도시 주변에서 채소 등의 식물을 자급해야 되는 실정이다. 지구 온난화를 막기 위한 조치이기 때문이다.

그리고 대도시 주변의 식물 생산 시스템으로는 식물공장이 가장 적합하다.

식물공장은 노지 재배에서 보다 대지면적, 투입 에너지, 물의 사용량, 인력소모가 10분지 1 이

하로 줄일 수 있기 때문이다.

식물공장의 건설은 특히 북위 45도 이북의 추운 지방과 죽위 15도 이하의 적도 부근 열대지방에서 절대 필요한 시설이다.

예를 들어 북유럽 지역에서 북위 50도 이상의 지역만 해도 런던(51.31도), 스톡홀름(59.20도), 암스테르담(북위 52.24도), 브뤼셀(50.50도) 등으로 절대 필요한 지역이고, 모스크바, 베를린, 폴란드의 바르샤바, 몽골의 울란바토르 등도 식물공장 절대 필요지역이 된다.

뿐만 아니라 북위 15도 이하의 열대지역, 싱가포르, 쿠알라룸푸르, 사우디아라비아, 두바이 등에서도 식물공장의 필요성은 절대적이다.

다행히 한국은 반도체 강국으로 세계 제일의 LED 제조 기술을 가지고 있고, 식물공장에 관한 설비기술의 연구에서도 앞서 가고 있다

이렇듯 LED를 이용한 식물의 재배기술, 빛의 혼합과 제어, 건설기술은 이미 많이 축적되어 있는 실정이므로 우리가 식물공장 시스템의 수출에 보다 적극적으로 관심과 노력을 기울인다면 우리는 앞으로 몇 년 내에 닥칠 세계 식물공장의 수요에 적극 대처할 수 있고, 나아가 조선, 전자제품과 반도체, 원자력 발전설비가 수출의 길을 걸듯, 더 나아가 식물공장 건설의 중주국으로 세계를 제패하게 되리라는 추측이다.

뿐만 아니라 국내에서는 가장 저렴하고 효율적인 갖가지 형태의 식물공장의 건립으로 농민들의 새로운 소득원을 찾아내는 것이 목적이기도 하다.

식물공장은 에너지와 물을 획기적으로 절약하는 농사 방법이고 무엇보다 농약을 전혀 사용하지 않는 농법으로, 식량증산과 함께 앞으로 나아가야 할 새로운 농업의 미래이기도 하다.

## 제 7 장    참고문헌

- [1] M. Rencz, V. Székely, A. Morelli, C. Villa, "Determining Partial Thermal Resistance with Transient Measurements, and Using the Method to Detect Die Attach Discontinuities", 18th IEEE SEMI-THERM Symposium
- [2] M. Rencz, V. Székely, " Structure function evaluation of stacked dies", Proc. of SEMI-THERM XX, March 2003, San Jose, CA, USA
- [3] V. Székely, T. Van Bien, Solid-State Electron. 31 (1988) 1363
- [4] JEDEC 51-1~51-12, methodology for the thermal measurement of component packages (single semiconductor device)
- [5] MIL-STD-7500 thermal impedance testing of diodes
- [6] SEMI G30-88 test method for junction-to-case thermal resistance measurement of ceramic packages
- [7] User's Manual of FLOTHERM, "Introduction to Version 4.1 Lecture Notes"
- [8] F.P.Incropera and D.P.DeWitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", 4th edition, John Wiley and Sons Inc.1996
- [9] S. Liu et al. , "Investigation of crack propagation in ceramic/adhesive/glass system", IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol., Vol.18, pp. 627-633, Sept. 1995
- [10] D. Suhir, "Thermally induced IC package cracking", IEEE trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol., vol. 13, pp.940-945, Dec. 1990
- [11] B. Miles and B. Freyman, "The elimination of the popcorn phenomenon in overmolded plastic pad array carries (OMPAC)", in Proc. Tech. Conf., 1992, pp.605-614
- [12] "Preconditioning of plastic surface mount devices prior to reliability testing", JESD22-A113, 1999
- [13] J. Park, M. Shin, and C. C. Lee, "Thermal modeling and measurement of GaN-based HFET devices", IEEE Electron Device Lett., vol. 24, pp.424 - 426, July 2003

- [14] M. Nishiguchi, M. Fujihara, A. Miki, and H. Nishizawa, "Precision comparison of surface temperature measurement techniques for GaAs IC's", IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol., vol. 16, pp. 543 - 549, Aug. 1993
- [15] P. D. Maycock, "Thermal conductivity of silicon, germanium, III-V compounds and III-V alloys", Solid-State Electronics, V.10, pp. 161-168, 1967